Lycées d'enseignement professionnel
Lycées techniques
Préparation aux C.A.P., B.E.P., B.P., B.Tn.
Formation permanente

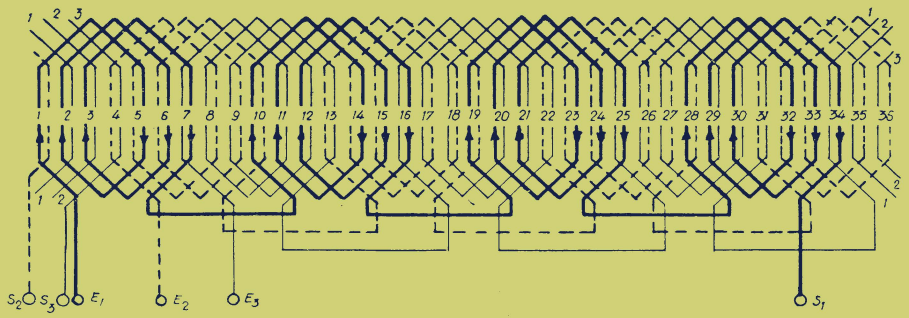
R. MERLET

technologie d'électricité

générale et professionnelle

3

bobinage des machines électriques et des transformateurs statiques



dunod

DU MÊME AUTEUR

Technologie d'électricité générale et professionnelle.

TOME I. — Matières premières. Installation de l'éclairage, du chauffage, des sonneries, des téléphones, des postes de soudage électrique, des appareils électro-domestiques. Etude et utilisation des appareils de mesure et de comptage. Les appareils de mesure. Organisation du travail dans une entreprise d'installations électriques.

TOME II. — Production, transformation et transport de l'énergie électrique. Les moteurs à courant continu et alternatif. Appareillage, mise en marche et contrôle automatique des machines électriques et des machines-outils. Etude des redresseurs, de l'électronique, des relais statiques à transistors, des fonctions logiques utilisées dans les dispositifs automatiques.

TECHNOLOGIE D'ÉLECTRICITÉ GÉNÉRALE ET PROFESSIONNELLE

PAR

R. MERLET

Professeur de l'Enseignement technique

TOME III

Bobinage des machines électriques et des transformateurs statiques

HUITIÈME ÉDITION
NOUVEAU TIRAGE

Lycées techniques
Lycées d'enseignement professionnel
Préparation aux C.A.P. (bobineur),
B.P., B.T.
Formation permanente

dunod

© BORDAS, Paris. 1976 - 118 879 0209

ISBN 2-04-008812-1

" Toute représentation ou reproduction, intégrale ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur, ou de ses ayants-droit, ou ayants-cause, est illicite (loi du 11 mars 1957, alinéa 1er de l'article 40). Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du Code pénal. La loi du 11 mars 1957 n'autorise, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, que les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective d'une part, et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration "

AVANT-PROPOS

Ce livre a été écrit pour permettre de comprendre et de réaliser un schéma ou un bobinage quelconque de machine électrique.

Le calcul des pas, l'exécution des schèmas et la réalisation des enroulements des machines électriques peuvent paraître complexes à première vue. En réalité, tout est simple dans ce domaine : quelques formules élémentaires permettent de comprendre tout le mécanisme de l'enroulement.

Il est bien entendu que cet ouvrage ne s'adresse pas à des techniciens de bureaux d'études, qui devront étudier une machine à partir de son circuit magnétique, pour terminer par le calcul de son échauffement et de son rendement.

Il a été écrit pour permettre aux élèves des Ecoles techniques et aux bobineurs professionnels de calculer les pas d'un bobinage, d'exécuter un schéma en partant de ces calculs, et de procéder à la réalisation pratique de l'enroulement.

Une progression soigneusement étudiée donne la possibilité à toute personne ayant quelques connaissances en électricité de suivre les explications du livre et de réaliser, avec l'aide des nombreux exemples schématiques, les bobinages les plus variés.

A la demande de plusieurs lecteurs, il a été adjoint au bobinage des machines électriques, un chapitre sur le bobinage élémentaire des transformateurs statiques et leur construction.

Cet ouvrage est particulièrement destiné :

1° aux élèves des Écoles techniques et aux bobineurs professionnels qui préparent le C. A. P. ou le Brevet professionnel de bobineur ;

2° aux élèves électriciens et électro-mécaniciens des Ecoles techniques, pour lesquels le bobinage des machines électriques ne doit pas être un secret, afin qu'ils puissent, au sortir de l'école, déceler le défaut d'un moteur en panne et en exécuter la réparation ; ils ne pourront le faire que s'ils ont des notions techniques de bobinage ;

3° aux professionnels : artisans, agents de maîtrise et bobineurs qui désirent se perfectionner.

Ce livre, écrit dans un style direct, ne traite que des cas simples. Il a été volontairement réduit afin de rendre son prix abordable. Il complète les deux ouvrages précédents de *Technologie générale et professionnelle d'électricité*, dont le tome I concerne la pose de tous les genres de canalisations électriques, l'installation des appareils électrodomestiques, de la lumière, des sonneries, des téléphones et de l'équipement automobile ; le câblage, les postes de soudage, les appareils de mesures et de contrôle y sont également traités ; des notions générales sur la profession d'électricien et l'organisation du travail dans une entreprise d'installations électriques complètent l'ouvrage. Le tome II traite des centrales électriques, des lignes aériennes et souterraines, de l'installation des moteurs à courant continu et alternatif et de leur appareillage, du contrôle automatique, des redresseurs, de l'électronique, des relais statiques à transistors, des fonctions logiques utilisées dans les dispositifs automatiques et de l'automatisation des machines-outils.

Raymond MERLET.

TABLE DES MATIÈRES

CHAPITRE PREMIER

Pages

Principaux tableaux contenus dans le livre XII

LES MACHINES A COURANT CONTINU

I,1. Principes de fonctionnement des machines à courant continu 1

CHAPITRE II.

CONSTITUTION DU SYSTÈME INDUCTEUR DES MACHINES A COURANT CONTINU

II,1. L'ensemble inducteur 4
II,2. Enroulement des bobines inductrices 7
II,3. Essai d'isolement à la masse 15
II,4. Pôles auxiliaires 16
II,5. Enroulement de compensation 21

CHAPITRE III.

L'INDUIT DES MACHINES A COURANT CONTINU

III,1. Le tambour d'induit 26
III,2. Constitution du collecteur 28
III,3. Les balais 31
III,4. Formes des rainures ou encoches 32

CHAPITRE IV.

ÉTUDE DES ENROULEMENTS IMBRIQUÉS A COURANT CONTINU

IV, 1. Conditions nécessaires pour obtenir un enroulement rationnel 35
IV, 2. Composition d'une section d'enroulement 36

Pages

IV, 3. Procédés d'enroulement 37
IV, 4. Représentation schématique des enroulements .. 38
IV, 5. Symboles employés en bobinage 40
IV, 6. Caractéristiques des enroulements imbriqués.... 41
IV, 7. Calcul des pas d'un enroulement imbriqué 44
IV, 8. Exemples d'enroulements imbriqués 46
IV, 9. Exécution d'un schéma panoramique 49
IV,10. Enroulements imbriqués multiples 51
IV,11. Bobinage à quatre faisceaux par encoche 55

CHAPITRE V.

ÉTUDE DES ENROULEMENTS ONDULÉS DES MACHINES A COURANT CONTINU

V,1. Conditions nécessaires pour obtenir un enroulement rationnel 60
V,2. Calcul des pas d'un enroulement ondulé..... 61
V,3. Enroulements ondulés série-simple 64
V,4. Enroulements ondulés série-parallèle 70
V,5. Variante pour le calcul des enroulements ondulés 74

CHAPITRE VI.

MACHINES A COURANT CONTINU CAS D'ENROULEMENTS SPÉCIAUX

VI,1. Enroulement des induits avec section morte ou fausses barres 78
VI,2. Enroulement des induits avec spire de fermeture 84
VI,3. Procédés de représentation partielle des enroulements 87
VI,4. Décalage de la mise au collecteur 93
VI,5. Enroulement des induits des petits moteurs .. 94

CHAPITRE VII.

CONNEXIONS ÉQUIPOTENTIELLES DES MACHINES A COURANT CONTINU

VII,1. Nécessité des connexions équipotentielles 102
VII,2. Calcul du pas des connexions équipotentielles ... 107
VII,3. Tableau des caractéristiques des principaux enroulements 111

CHAPITRE VIII.

ISOLEMENT ET RÉALISATION DES BOBINAGES

Pages

VIII, 1. Isolement des machines électriques et conducteurs employés 112
VIII, 2. Classification des produits isolants utilisés en bobinage 113
VIII, 3. Isolement des fils et des barres 118
VIII, 4. Isolement des sections et bobines 120
VIII, 5. Outillage du bobineur 123
VIII, 6. Habillage de l'induit 124
VIII, 7. Procédés de bobinage 125
VIII, 8. Etude du développement d'une section de bobinage 127
VIII, 9. Confection des gabarits des sections de bobinage. 131
VIII,10. Mise en place des sections 136
VIII,11. Mise au collecteur et soudage des bobinages 139
VIII,12. Frettage des induits 146
VIII,13. Equilibrage des rotors 152
VIII,14. Induits de démonstration 153

CHAPITRE IX.

ESSAIS DIÉLECTRIQUES ET IMPRÉGNATION DES BOBINAGES

IX,1. Procédés et tensions employées au cours des essais diélectriques 157
IX,2. Recherche des défauts (court-circuit, coupures) . 158
IX,3. Imprégnation des bobinages..... 163
IX,4. Application des vernis isolants 165
IX,5. Point de goutte d'un compound 170
IX,6. Force électro-motrice des machines à courant continu 171
IX,7. Les pannes des machines électriques 173

CHAPITRE X.

LES MACHINES A COURANT ALTERNATIF

X,1. Classement des machines à courant alternatif... 180
X,2. Etude des enroulements à courant alternatif ... 181
X,3. Exécution des schémas de bobinage, symboles utilisés 187

CHAPITRE XI.

Pages

LES MOTEURS ASYNCHRONES MONOPHASÉS

XI,1. Constitution des moteurs asynchrones monophasés 190
XI,2. Réalisation des schémas monophasé, connexions entre bobines..... 191
XI,3. Bobinage des stators de moteurs asynchrones monophasés 198
XI,4. Enroulement à phase auxiliaire 199

CHAPITRE XII.

LES MOTEURS ASYNCHRONES POLYPHASÉS

XII, 1. Généralités et schémas de bobinages diphasés ... 205
XII, 2. Considérations sur les stators des moteurs asynchrones triphasés 206
XII, 3. Enroulement à un faisceau par encoche 209
XII, 4. Pas des bobines dans les encoches 211
XII, 5. Disposition des entrées de phases 215
XII, 6. Différents types d'enroulements triphasés 218
XII, 7. Bobinage à nombre fractionnaire d'encoches par pôle et par phase et 30 schémas de bobinage.. 224
XII, 8. Bobinage à deux faisceaux par encoche 245
XII, 9. Stators à deux polarités et deux vitesses 252
XII,10. Couple et puissance des moteurs à 2 vitesses 258
XII,11. Moteurs à deux bobinages et 2 ou 3 vitesses 262

CHAPITRE XIII.

RÉALISATION DU BOBINAGE DES STATORS DE MOTEURS ASYNCHRONES

XIII,1. Conducteurs et encoches 266
XIII,2. Bobinage avec fils égrené et bobines enchevêtrées 267
XIII,3. Bobinage des sections groupées 270
XIII,4. Bobinage à plusieurs fils en mains (fils en parallèle) 272

Pages

XIII,5. Bobinage concentrique avec fils passés 273
XIII,6. Bobinage avec barres 274
XIII,7. Isolement des encoches des stators et des rotors . 275

CHAPITRE XIV.

ÉTUDE SIMPLIFIÉE DES BOBINAGES A COURANT ALTERNATIF

XIV,1. Changement des caractéristiques du bobinage d'un stator 277
XIV,2. Transposition où la tension change, la puissance restant la même (Calculs et tableaux) 277
XIV,3. Transposition où la tension demeure et où la puissance change 286
XIV,4. Transposition à tension et puissance variables .. 288
XIV,5. Le facteur de remplissage d'encoche 288
XIV,6. Calculs simplifiés du bobinage des stators 291
XIV,7. Tableau des diamètres des fils nus et isolés 299

CHAPITRE XV.

ROTORS DES MOTEURS ASYNCHRONES

XV,1. Différents types de rotors 301
XV,2. Les rotors bobinés 301
XV,3. Enroulement à fil tiré 305
XV,4. Enroulement à barres et barres d'imbrication ... 308
XV,5. Les rotors à cage et double cage d'écureuil 311
XV,6. Les rotors à encoches profondes 316

CHAPITRE XVI.

LES GÉNÉRATEURS DE COURANT ALTERNATIF

XVI,1. Les alternateurs 318
XVI,2. F.E.M. efficace des alternateurs 321
XVI,3. Bobinage des alternateurs monophasés 323
XVI,4. Bobinage des alternateurs triphasés 328
XVI,5. Le stator d'alternateur 342
XVI,6. Inducteurs ou rotors d'alternateurs 355
XVI,7. Bobinage des rotors d'alternateurs 360

CHAPITRE XVII

pages

LES TRANSFORMATEURS

XVII,1. Théorie élémentaire des transformateurs 363
XVII,2. Les transformateurs statiques bobinés 369
XVII,3. Le circuit magnétique 371
XVII,4. Enroulement des transformateurs 375
XVII,5. Les transformateurs monophasés 380
XVII,6. Les transformateurs monophasés spéciaux 381
XVII,7. Les transformateurs triphasés 382
XVII,8. Calcul élémentaire d'un transformateur triphasé 394

CHAPITRE XVIII

CONSTRUCTION DE TRANSFORMATEURS DE PETITES PUISSANCES

XVIII,1. Réalisation d'un transformateur monophasé de 100 W-110/20 V-50 Hz 407
XVIII,2. Montage d'un transformateur monophasé de 3 kVA. Alimentation en 110 ou 220 V-50 Hz . 411
XVIII,3. Construction d'un transformateur triphasé de 200 W-220/30 V-50 Hz 415
XVIII,4. Fabrication d'un transformateur triphasé de 2 kVA-220/20 V, 40 V, 60 V, 80 V-50 Hz 419

PRINCIPAUX TABLEAUX CONTENUS DANS LE LIVRE

Symboles employés en bobinage à courant continu 38
Tableau des caractéristiques des enroulements en courant continu 111
Classification des isolations (matières isolantes) 114
L'outillage du bobineur 123
Recherche des pannes dans les machines électriques 174
Liste des symboles utilisés en bobinage alternatif 187
Nombre de conducteurs par encoche en fonction de la tension du réseau 284
Tableau comparatif des sections des conducteurs d'un stator en fonction de la tension d'alimentation 285

Pages

Diamètre des fils nus, isolés émail, rayonne, coton, (résistance) 299
Diamètre des fils nus, émaillés, isolés soie et rayonne 300
Tableau des coefficients de bobinage des machines à courant alternatif 341
Tableau des 12 couplages possibles entre les bobinages d'un transformateur 384
Tableau des symboles des transformateurs 406

CHAPITRE PREMIER

LES MACHINES A COURANT CONTINU

I,1. PRINCIPES DE FONCTIONNEMENT DES MACHINES A COURANT CONTINU

1,1. Les générateurs électriques

Principe de fonctionnement.

Lorsqu'un conducteur se déplace dans un champ magnétique en coupant les lignes de force de ce champ, il est le siège d'une force électromotrice induite.

C'est sur ce principe que l'on a construit les générateurs à courant continu, qui comprennent un système inducteur fixe et un induit mobile composé d'un cylindre de tôles assemblées et rainées pour y loger des conducteurs.

Si l'on fait tourner le cylindre, les conducteurs qu'il supporte coupent les lignes de force du champ magnétique produit par les inducteurs. Ces conducteurs sont le siège d'une force électromotrice induite dirigée en sens inverse de part et d'autre de la ligne neutre, comme l'indique la *figure I*-1.

Les forces électromotrices ainsi obtenues s'ajoutent dans les conducteurs judicieusement reliés entre eux.

Sur la ligne neutre, **les conducteurs qui s'y trouvent** momentanément ne coupent plus les lignes de force du champ. C'est à cet endroit que le courant change de sens dans le bobinage et qu'on le recueille par l'intermédiaire du collecteur et des balais.

Pour déterminer le sens du courant dans les conducteurs d'un induit en tambour, **on applique la règle dite « des trois doigts de la main gauche ».**

Le pouce se place dans la direction du champ magnétique, l'index dans le sens de rotation de l'induit et le majeur donne le sens du courant qui circule dans les conducteurs.

Connaissant deux des trois indications ci-dessus, on arrive toujours à trouver l'inconnue.

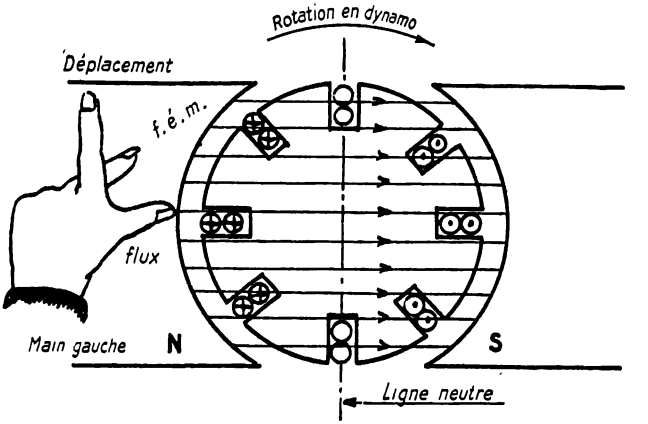


FIG. I-1. — Recherche du sens du courant dans les conducteurs d'un induit au moyen de la règle des trois doigts de la main gauche pour la marche en dynamo. Le courant pénètre perpendiculairement au plan de la figure par les conducteurs marqués d'une croix et il ressort à droite de la ligne neutre par les conducteurs centrés par un point. Ce dernier figure la pointe d'une flèche et la croix l'arrière de la flèche.

1,2. Les moteurs électriques

Principe de fonctionnement.

Un conducteur placé dans un champ magnétique et parcouru par un courant est soumis à une ***force mécanique*** dont le sens se trouve déterminé par la direction du champ et celle du courant.

C'est sur ce principe que sont basés les moteurs électriques.

Les dynamos sont réversibles, elles prennent un mouvement de rotation et deviennent moteurs lorsqu'elles sont alimentées par un courant électrique.

La dynamo devenue moteur transforme l'énergie électrique qu'elle reçoit en énergie mécanique récupérable sur son arbre.

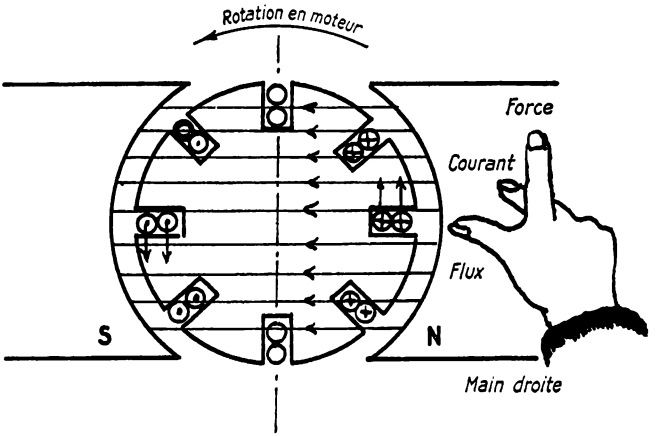


FIG. I-2. — De part et d'autre de la ligne neutre, les conducteurs sont soumis à une force qui est dirigée dans le sens donné par les flèches et indiquée par les trois doigts de la main droite (marche en moteur).

En tenant compte de ce qui est écrit au début de ce chapitre et en se rapportant à la *figure I-2*, il suffit d'appliquer la règle des trois doigts de la main droite pour trouver le sens de la force qui agit sur les conducteurs et donne de ce fait le sens de rotation du moteur.

De ce qui précède, il ressort que les dynamos et les moteurs étant réversibles, la construction de ces machines et les règles de bobinage sont les mêmes.

CHAPITRE II

CONSTITUTION DU SYSTÊME INDUCTEUR DES MACHINES A COURANT CONTINU

II,1. L'ENSEMBLE INDUCTEUR

Description.

Un ensemble inducteur comprend :
— un bâti en acier coulé, appelé « culasse »;
— des noyaux polaires;
— des bobines inductrices.

1,1. La culasse de l'inducteur.

C'est elle qui ferme le circuit magnétique composé des noyaux polaires et de l'induit. La culasse sert également de support aux noyaux polaires et aux flasques qui se vissent de part et d'autre du bâti.

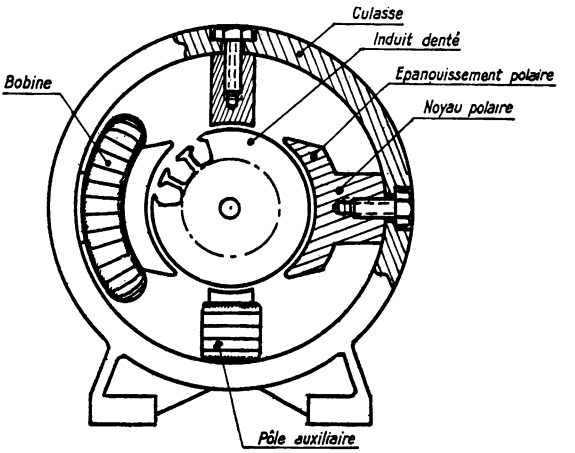


FIG. II-1. — Détail du circuit magnétique d'un moteur bipolaire à courant continu avec pôles auxiliaires.

Constitution.

L'acier coulé et les tôles soudées utilisés pour les culasses contiennent de 0,2 à 2 % de carbone.

La fonte de moulage s'emploie également pour la fabrication des culasses des machines à courant continu et dans la construction de certains gros alternateurs. Contenant de 2 à 5 % de carbone, elle est relativement fragile et moins perméable au flux magnétique que l'acier.

Les noyaux polaires se font avec les mêmes matières, mais il est plus avantageux d'utiliser l'acier. En effet, un pôle construit en fonte moulée nécessite 30 ampères-tours pour obtenir une induction de 0,7 tesla (ou 7 000 gauss). Avec un pôle en acier, 30 At donnent une induction de 1,4 tesla (ou 14 000 gauss).

De ce fait, à égalité de flux, un pôle en fonte devra avoir une section double de celle d'un pôle en acier et il faudra un plus grand poids de cuivre pour en réaliser le bobinage, le flux produit par un pôle étant fonction du nombre de tours N.

1, 2. Les noyaux polaires.

Ils peuvent être coulés solidairement avec la culasse, ou rapportés. Ce dernier procédé est le plus employé.

Description organique et fonctionnelle.

Les noyaux polaires rapportés sont fixés à l'intérieur de la culasse au moyen d'une ou plusieurs vis.

Le réglage de l'entrefer entre les noyaux polaires et l'induit se fait au moyen de tôles minces, au profil du pôle, que l'on glisse entre la culasse et les noyaux. Ce réglage est important, car il donne la possibilité, avec une intensité d'excitation fixée d'avance, de fournir le flux envisagé par le constructeur.

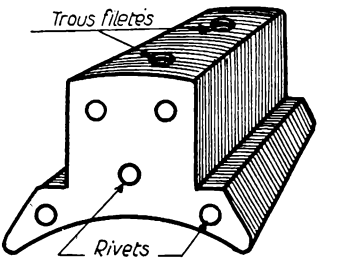


FIG. II-2. — Vue d'un pôle inducteur de dynamo à courant continu. Les deux trous filetés de la partie supérieure serviront à fixer le noyau sur la culasse. Les cinq rivets d'assemblage sont isolés des tôles par un tube isolateur.

L'entrefer varie entre quelques dixièmes de millimètre et plusieurs millimètres pour les machines de grande taille.

Les noyaux polaires peuvent être massifs ou feuilletés. S'ils sont massifs, les épanouissements polaires sont rapportés et vissés sur les noyaux. S'ils sont feuilletés, les épanouissements polaires font corps avec le noyau. L'ensemble est constitué par des tôles laminées de 1 à 2 mm d'épaisseur, assemblées et rivées.

Les épanouissements polaires sont destinés à augmenter la section de passage du flux de l'inducteur à l'induit. Leur longueur d'arc correspond sensiblement aux deux tiers du pas polaire, qui est égal à 180° dans une machine bipolaire et à 90° dans une machine à quatre pôles.

Les épanouissements polaires sont feuilletés pour diminuer les courants de Foucault, produits par les pulsations du flux au moment du passage des dents et des rainures de l'induit sous le pôle.

Dans la plupart des machines, les becs polaires sont légèrement évasés afin de permettre une action progressive du champ sur les conducteurs qui entrent sous le pôle.

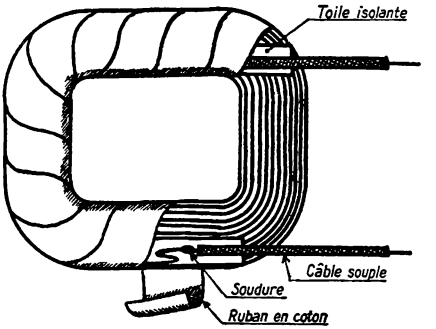


FIG. II-3. — Disposition des entrée et sortie du fil dans une bobine inductrice à fil rond. Le début du bobinage qui constitue l'entrée de la bobine doit être sérieusement isolé, car il traverse toutes les couches du bobinage.

1,3. Les bobines inductrices.

Elles sont constituées par des spires de fil en cuivre destinées à produire le flux magnétique nécessaire au fonctionnement de la dynamo.

L'enroulement se fait sur un gabarit, sous la forme d'une couronne, que l'on place sur le noyau polaire. Un isolement préalable de la couronne, renforcé parfois par un isolant disposé sur le noyau, doit offrir une résistance électrique suffisante contre une mise à la masse de la culasse.

La section du fil et le nombre de spires enroulées varient avec l'importance de la machine et son type d'excitation : série ou dérivé.

II,2. ENROULEMENT DES BOBINES INDUCTRICES

Généralités.

La section du fil et le nombre de spires d'une bobine inductrice sont déterminés par les ampères-tours nécessaires à l'alimentation du circuit magnétique de la machine.

Ces calculs se font dans un bureau d'études, par des ingénieurs chargés de ce travail.

L'exécution des bobines s'opère ensuite en tenant compte de la place disponible sur les noyaux polaires.

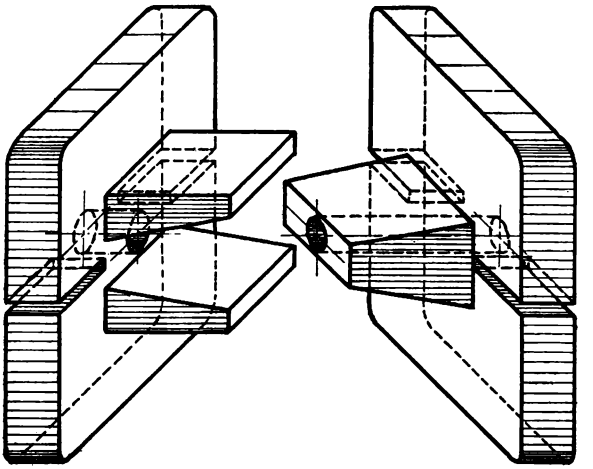


FIG. II-4. — Moule en bois pour l'enroulement des bobines inductrices. Les deux parties s'assemblent au moyen d'un boulon spécialement conçu pour sa fixation sur un tour.

Enroulement.

Le bobinage se fait sur un moule en tôle ou en bois, qui a la forme ronde, carrée ou rectangulaire du noyau polaire.

Ce moule comporte deux joues destinées à retenir les couches successives de l'enroulement.

Un certain nombre de saignées, réparties sur le pourtour des joues, permettent de passer des bouts de tresse sous la bobine et de faire des attaches qui maintiendront les spires en place lors du démontage (*fig. II-4*).

Le noyau du moule doit avoir une section légèrement conique pour faciliter l'enlèvement de la bobine.

La section du moule devra, en outre, tenir compte de l'épaisseur de l'isolant qui recouvrira la bobine et le noyau polaire.

L'enroulement industriel des bobines inductrices se fait au moyen de tours spéciaux munis d'un compte-tours.

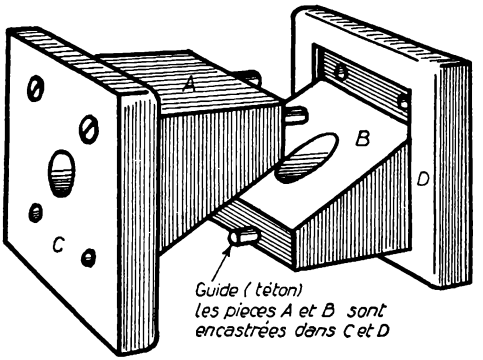


FIG. II-5. — Deuxième modèle de gabarit en bois permettant l'enroulement des bobines inductrices en fil rond ou petit méplat. Les deux parties s'assemblent au moyen d'un boulon central conçu pour être fixé et entraîné par un tour. Avant d'enrouler le fil, on place des rubans au fond du gabarit. Ils serviront à lier la bobine au démontage.

2,1. Profil et isolement du fil bobines inductrices

Les fils utilisés sont ronds et quelquefois méplats avec arrondis aux angles pour diminuer les possibilités d'amor-

çage entre conducteurs et réduire les risques de coupure de l'isolant.

Dans une bobine où la tension entre spires voisines est très faible, on peut utiliser du fil isolé avec un seul guipage de coton. Cet isolement réduit l'encombrement d'une part et l'échauffement d'autre part, du fait qu'une seule couche de coton recouvre le fil.

D'une façon générale, l'isolement est constitué par deux couches de coton enroulées en sens inverse (Classe A).

Pour réduire le volume des bobines, on utilise surtout du fil émaillé.

Pour les machines de la classe B (voir page 116) l'isolement du fil est constitué soit par deux couches de silionne (soie de verre) soit par deux couches d'amiante.

Pour renforcer l'isolement entre deux couches successives, on interpose une feuille de papier, ou de T.M.P., ou de S.M.S., suivant la classe de fonctionnement de la machine. Ce renforcement d'isolement peut être mis toutes les deux ou trois couches seulement.

Les inducteurs des machines importantes.

Ils se font avec une bande de cuivre rectangulaire, enroulée à plat ou sur champ. L'isolement entre spires

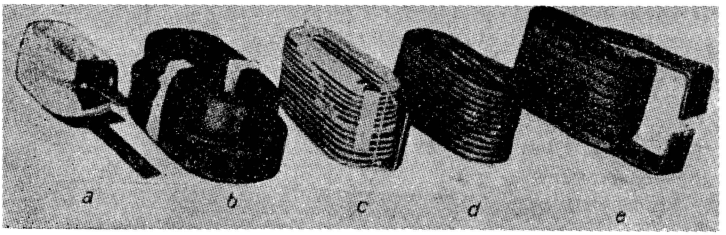


FIG. II-6 — Bobines de pôles inducteurs et auxiliaires en cours de fabrication. En partant de la gauche : *a*) Une bobine inductrice en fil rond, avec ses sorties rigides en cuivre plat; *b*) Bobine inductrice avec bande de cuivre isolé au papier; *c*) Pôle auxiliaire en cours d'isolement; une spire sur deux est isolée. *d* et *e* représentent le pôle *c* avant et après la soudure de ses sorties. Le cuivre est enroulé sur champ.

est constitué par des bandes de presspahn, ou encore en collant sur une face du cuivre une bande d'un composé d'amiante appelé « asolite ».

2,2. Fabrication des bobines inductrices en fil fin guipé

Le fil peut être à 1 ou 2 guipages de soie, de coton, de nylon ou de rayonne. Les bobines sont confectionnées sur un tour à bobiner au moyen d'un gabarit approprié.

Pour empêcher les spires de la bobine de sortir de leur alignement, lors du démoulage, on fait un certain nombre de saignées dans les joues du gabarit. Ces saignées permettront de placer des ficelles ou des fils de cuivre recuits sur le pourtour du gabarit dès la première spire. Ces fils d'attache serviront à conserver le bobinage en forme lors du démoulage et pendant l'enrubannage.

Un second procédé employé consiste à maintenir les fils en place au moyen de tresses de coton ou de toile huilée réparties autour du gabarit de la bobine, comme l'indique la *figure II-7*. On place, dès la première spire, la tresse au fond du gabarit, puis on bobine une ou deux couches de fil avant de replier la tresse, comme le montre la *figure II-7*.

Ces rubans gênent évidemment la rapidité d'exécution, mais ils permettent d'obtenir une bobine homogène.

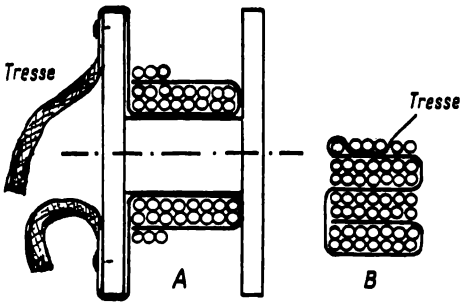


FIG. II-7. — En *A*, bobine inductrice en cours de bobinage. Les spires du fil sont retenues par une tresse qui les maintient ensemble au démoulage. En *B*, une coupe de la bobine terminée qui doit en outre être attachée sur ses 4 côtés par des tresses avant l'isolement.

Les bobineurs se contentent souvent d'utiliser ce procédé pour le début et la fin de l'enroulement et combinent ce système avec les attaches citées plus haut.

Lorsque le fil employé pour construire la bobine est de faible section et pour donner plus de souplesse aux entrée et sortie des bobines à fil de grosse section, on soude un câble souple, de section appropriée, aux extrémités du fil, comme indiqué sur la *figure II*-3.

Si la bobine est constituée par du cuivre rond ou méplat de très forte section, le câble souple est remplacé par des sorties rigides en cuivre plat étamé (*fig. II*-6).

Ces sorties sont percées pour permettre la fixation des cosses soudées aux extrémités des câbles souples qui serviront de connexion entre bobines.

Les bobines sont ensuite isolées par une ou plusieurs couches de jaconas, que l'on recouvre ***d'un jaconas provisoire*** pour subir l'imprégnation au vernis compound C. 225.

Ce traitement terminé, on enlève le jaconas provisoire et on forme la bobine sur un gabarit de moulage, puis on la vernit à nouveau par trempage et on la sèche à l'air.

2,3. Fabrication des bobines en fil fin émaillé

Le bobinage se fait dans les mêmes conditions qu'avec le fil guipé. Les couches de fil seront maintenues par des frettes en papier de 0,3 mm d'épaisseur. On peut renforcer l'isolement en plaçant du papier entre chaque couche de fil.

Ces bobines ne se traitent pas au compound. On les sèche à l'étuve, on recuit l'émail à 120 °C pendant 6 heures, puis on les trempe encore chaudes dans le vernis 505. Immersion complète, jusqu'au moment où les bulles d'air ont cessé d'apparaître sur le bain de vernis. Puis on les sèche à l'air libre. Ensuite, on les isole par plusieurs couches de ruban diagonal verni en vernissant chaque couche. La dernière couche est constituée par un jaconas de protection. Les bobines sont ensuite passées au vernissage par trempage dans le vernis 505.

2,4. Fabrication des bobines en cuivre plat

Deux procédés peuvent être employés : dans un cas, le cuivre est enroulé sur champ, dans l'autre, il est enroulé à plat.

On utilise généralement le cuivre plat quand sa section est importante.

L'enroulement sur champ du cuivre méplat se fait au moyen d'un gabarit en bois, au profil du noyau polaire, compte tenu de l'épaisseur de l'isolement à la masse.

Pour la classe A, l'isolement se fait en enrubannant chaque spire, ou une spire sur deux, avec du jaconas. Un deuxième procédé consiste à coller entre spires un cadre isolant en carton lustré.

Pour la classe B, on emploie soit un cadre en Asolite ou en Micanite, soit du ruban micacé.

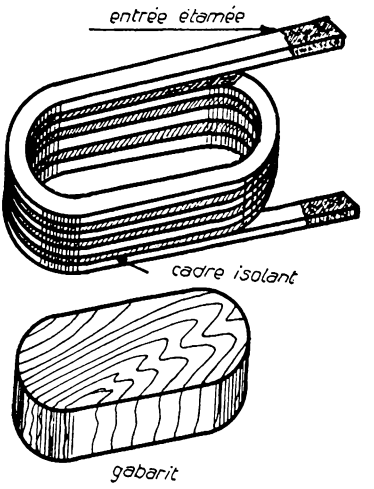


FIG. II-8. — Gabarit en bois pour l'enroulement d'un pôle en cuivre méplat sur champ et bobine terminée.

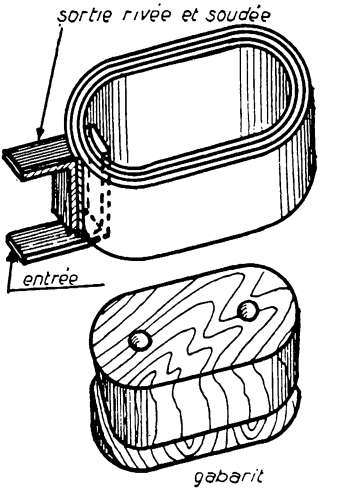


FIG. II-9. — Gabarit en deux pièces pour la confection des pôles en cuivre roulé à plat et sa bobine.

L'enroulement des pôles en cuivre bobiné à plat *s'opère sur un gabarit en deux pièces.* L'entrée et la sortie sont reliées à une plaque rapportée en cuivre, plus épaisse que le cuivre du pôle, que l'on rive et soude. L'isolement entre spires s'effectue en même temps que le moulage, avec un ruban de mica ou de silionne. Ces bobines se confectionnent généralement sur des machines appropriées automatiques.

2,5. Isolement des bobines inductrices

Lorsque l'enroulement a été effectué sur un moule à joue mobile, on enrubanne la bobine avec une tresse de coton, puis, s'il y a lieu, on la cintre sur un appareil, afin de lui donner la courbure de la culasse.

La bobine étant terminée, on l'imprègne d'un vernis isolant et on la sèche à l'étuve. Elle forme alors un bloc rigide bien isolé et protégé contre l'humidité qui diminue la qualité des isolants en provoquant leur pourriture.

Sauf pour les bobines soumises à une très grande intensité, qui ont des prises rigides sous forme de bandes de

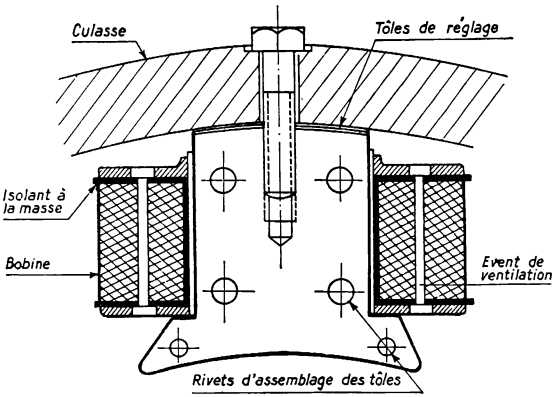


FIG. II-10. — Les bobines sont isolées des noyaux polaires au moyen de presspahn, de fibre vulcanisée, etc..., d'une épaisseur de 1 mm en moyenne. L'isolement s'effectue en plaçant une bande de presspahn enroulée sur le noyau et en ajoutant deux joues d'isolant découpées au profil de la bobine (*En noir sur la figure*). L'épaisseur de la tôle de réglage permet de faire varier à volonté l'entrefer entre pôle et induit.

cuivre plat (Voir *fig. II*-6), les entrées et sortie des bobines sont constituées par des câbles souples.

Ces câbles sont soudés aux extrémités du bobinage et soigneusement isolés. Ils ont pour but de donner plus de souplesse aux sorties des bobines faites avec du gros fil et d'augmenter leur résistance mécanique lorsque les bobines sont constituées par du fil de faible section.

Afin d'éviter la rupture du fil de la dernière spire, lorsque le câble subit une traction, il est prudent de faire un S avec l'extrémité du conducteur soudée au câble, comme l'indique la *figure II*-3.

L'isolement à la masse des bobines s'effectue en recouvrant de presspahn ou de fibre vulcanisée les noyaux polaires et les joues de la bobine.

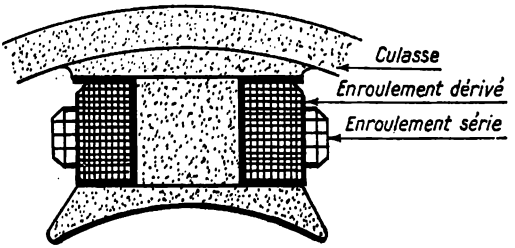


FIG. II-11. — Disposition des enroulements en dérivation et en série d'un pôle de machine compound.

2,6. Liaison entre les différentes bobines inductrices

Les bobines inductrices sont généralement reliées en série. Le courant qui les parcourt doit produire des pôles magnétiques alternativement « Nord » et « Sud ».

Lors de la construction, les bobines sont enroulées toutes dans le même sens; c'est au montage qu'on les relie entre elles en croisant les sorties de câbles toutes les deux bobines.

Dans les machines compound, l'enroulement série est souvent placé sur la bobine excitée en dérivation (Voir *fig. II*-11), mais les bobinages sont séparés par un isolement renforcé en presspahn ou en leathéroïd, puis le tout est enrubanné ensemble, passé au vernis et étuvé.

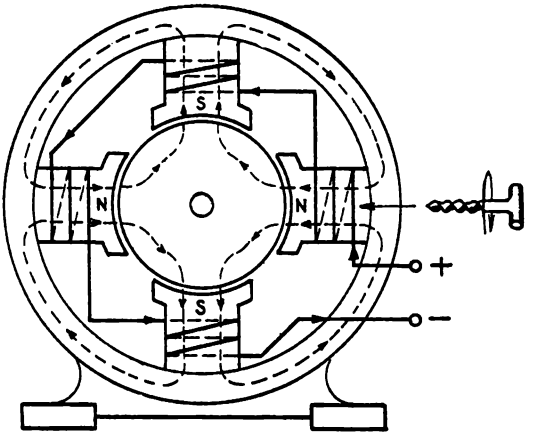


FIG. II-12. — Disposition de l'enroulement inducteur d'une dynamo à 4 pôles. En appliquant la règle du tire-bouchon de Maxwell, on vérifie si les pôles sont successivement nord et sud. En effet, en faisant subir au tire-bouchon la rotation du courant dans chaque bobine, on obtient le sens d'enfoncement du tire-bouchon qui donne la direction des lignes de force du champ.

II,3. ESSAI D'ISOLEMENT A LA MASSE

L'essai à la masse des pôles montés sur leurs noyaux est appelé « épreuve de rigidité diélectrique ». Il est effectué durant 60 secondes avec une tension alternative de 50 Hz.

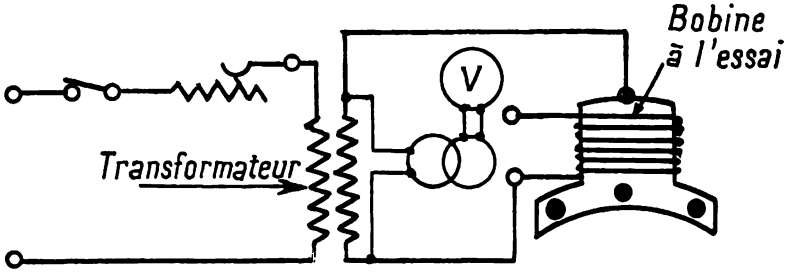


FIG. II-13. — Essai à la masse d'une bobine inductrice placée sur son noyau polaire.

Une résistance réglable insérée dans le circuit primaire permet de régler la tension d'essai au secondaire.

Pour exécuter cet essai, on utilise un transformateur élévateur à faible puissance, dont on relie le secondaire H. T. à une extrémité du bobinage d'une part, et à la masse du pôle d'autre part.

La tension d'essai est 2 U + 1 000 volts. U est la tension normale d'utilisation du pôle.

Si l'isolement présente un point faible, un amorçage prend naissance à cet endroit sous forme d'un arc électrique, avec parfois un accompagnement de dégagement de fumée. Dès que l'amorçage se produit, il faut couper le courant afin de limiter les dégâts produits par l'arc électrique.

Pour prévenir les accidents en cours d'essai, il est recommandé de relier le noyau du pôle à une terre.

II,4. POLES AUXILIAIRES

Dès que la machine atteint quelque importance, on installe, entre les pôles principaux, des pièces polaires étroites appelées pôles auxiliaires ou pôles de commutation (*fig. II*-16).

Ces pôles, placés sur la ligne neutre, comportent un enroulement de grosse section alimenté en série avec le

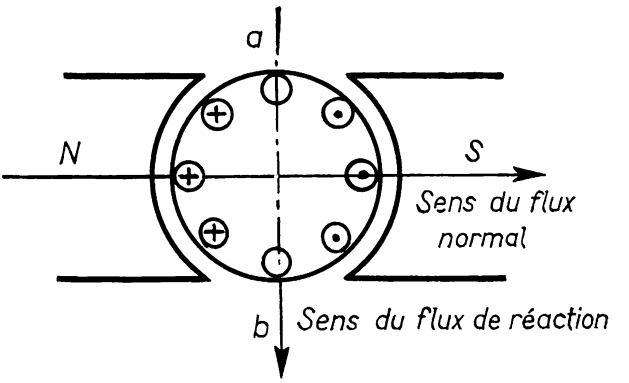


FIG. II-14. — L'induit représenté sur la figure peut être comparé à une bobine d'axe a — b, soumise au flux des pôles N et S.

courant de l'induit. Ils précèdent, dans le sens de rotation du moteur, un pôle de même polarité.

En prenant le cas d'un induit de dynamo bipolaire qui débite, on constate que le sens du courant dans les conducteurs est donné par la règle des trois doigts de la main gauche (*fig. I*-1).

L'induit peut alors être comparé à une bobine d'axe *a* — *b*, représentée par la *figure II*-14. Le sens du flux créé par cette bobine (composée des conducteurs de l'induit) est donné par la règle du tire-bouchon (*fig. II*-12).

Ce flux est appelé « flux de réaction d'induit ». Il nuit à la bonne commutation de la génératrice et engendre des étincelles sous les balais.

Pour annuler ce flux, on place, sur la ligne neutre, des pièces polaires étroites appelées « pôles auxiliaires », bobinées de façon que le flux produit par ces pôles soit opposé et égal au flux de réaction d'induit.

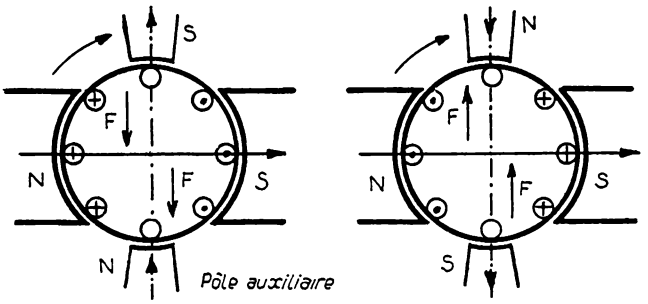


FIG. II-15. — Le sens du flux de réaction d'induit F provoqué par les conducteurs de l'induit est donné en appliquant à ces conducteurs la règle du tire-bouchon. On constate, sur les dessins, qu'il est le même de part et d'autre de la ligne neutre.

Le flux fourni par les pôles auxiliaires devra avoir un sens opposé au flux de réaction d'induit F, ce qui conduit à changer leur polarité pour un même sens de marche en génératrice ou en moteur. (A gauche, en générateur et à droite en moteur).

La force magnétomotrice créant le flux de réaction d'induit est proportionnelle au courant de l'induit.

Pour annuler ce flux à toutes les charges, l'enroulement des pôles auxiliaires doit être parcouru par le courant débité par l'induit de la dynamo.

Un deuxième phénomène vient entraver la bonne commutation de la génératrice; il s'agit de la *tension de réaction.*

4,1. Rôle des pôles auxiliaires

Lorsque, dans la rotation de la machine, une lame du collecteur quitte le balai sous laquelle elle vient de passer, il se produit une étincelle qui sera d'autant plus importante que la puissance et la vitesse demandées seront élevées.

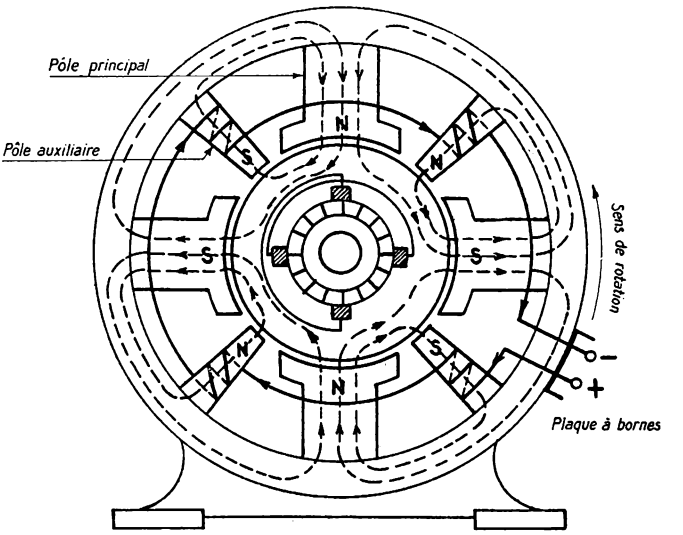


FIG. II-16. — Dynamo tétrapolaire à pôles auxiliaires. Cette figure donne le sens et la répartition du champ dans les différentes parties du circuit magnétique. L'enroulement des pôles auxiliaires qui aboutit à la plaque à bornes est mis en série avec l'induit à cet endroit. On remarque que les pôles auxiliaires précèdent les pôles principaux dans le sens de rotation de l'induit. Les balais sont dessinés à leur place réelle, dans l'axe des pôles. Ils collectent le courant des faisceaux qui passent sur la ligne neutre.

Ces étincelles sont engendrées par la tension de réactance, qui prend naissance dans les spires court-circuitées sous les balais d'une part et par le flux de réaction d'induit d'autre part.

Pour diminuer ces étincelles, qui abîment les collecteurs, on peut décaler les balais dans une zone de quelques degrés par rapport à la ligne neutre.

La section n'étant plus sur la ligne neutre est placée sous l'influence d'un pôle convenablement choisi. Une F.E.M. prend naissance dans la section et il en résulte un courant i qui doit être de sens contraire au courant principal I de l'induit, d'où un courant résultant i'.

$$i' = I - i.$$

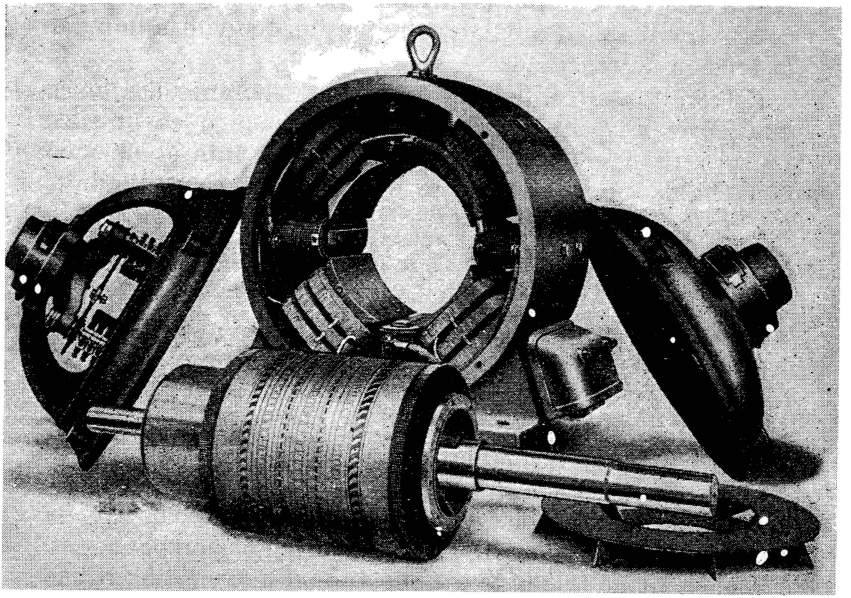


FIG. II-17. — Constitution d'un moteur à courant continu à excitation dérivée. On remarque à l'intérieur de la culasse les 4 pôles principaux à bobines séparées pour faciliter le refroidissement et les 4 pôles auxiliaires. L'induit est bobiné avec des barres et le ventilateur qu'il supporte est démonté et placé sous son arbre. Les deux flasques, dont l'un supporte les porte-balais, complètent le moteur.

Le courant résultant i' est d'autant plus faible que la section court-circuitée par les balais se rapproche de l'axe des pôles, i devenant plus important au fur et à mesure que l'angle de décalage grandit.

Par contre, la F.E.M. de la machine diminue avec l'importance du décalage.

4,2. Réglage des balais

Il s'effectue par des essais successifs de décalage, au régime de charge le plus couramment employé avec la dynamo ou le moteur.

Toutefois, avec les pôles auxiliaires, ce décalage n'a plus lieu d'exister, leur but étant de créer, dans les spires en court-circuit sous les balais, une tension tendant à annuler la tension de réactance.

Ce résultat est obtenu en plaçant les bobines des pôles auxiliaires en série avec l'induit, de façon à ce qu'elles fournissent une force électromotrice suffisante et de sens convenable pour annuler le flux de réaction d'induit, quels que soient le régime et le sens de rotation de la machine. (Voir fig. *II*-15).

4,3. Enroulement des bobines des pôles auxiliaires

Il est exécuté en utilisant des formes en bois, comme s'il s'agissait des pôles principaux.

Les conducteurs employés sont constitués par du fil de cuivre rond pour les petites machines et par une bande de cuivre, dont la largeur occupe toute la hauteur du noyau polaire, quand il s'agit de machines importantes. L'isolement de la bande est effectué au moyen d'un ruban de papier enroulé avec le cuivre; le tout est ensuite enrubanné au coton et imprégné de vernis.

L'enroulement des pôles constitués par une bande de cuivre sur champ est exécuté sur des machines spéciales, le plus souvent à bras d'homme. Le noyau de la forme est alors en acier, ce qui permet un serrage sérieux des spires.

II,5. ENROULEMENT DE COMPENSATION

Principe.

Lorsqu'un courant passe dans les conducteurs d'un induit, il engendre dans ceux-ci un flux dont les lignes de force se ferment par les pièces polaires. Ce flux a pour effet de modifier le trajet du flux inducteur fourni par les pôles.

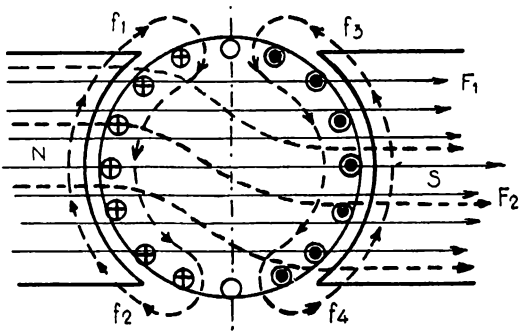


FIG. II-18. — Lorsque les conducteurs de l'induit sont parcourus par un courant, ils produisent un flux transversal f par rapport au flux F_1 émis par les pôles. Il s'ensuit un flux résultant F_2 distordu, qui peut être redressé au moyen de barres de compensation disposées dans les épanouissements polaires, comme l'indique la figure qui suit.

Dans la figure II-18, on admet que, dans la moitié gauche de l'induit, le courant s'enfonce dans les conducteurs pour en ressortir dans la moitié droite.

Application.

En appliquant la règle du tire-bouchon à chaque conducteur, on obtient un flux transversal, comme l'indique la figure II-18. Il en résulte qu'au bec polaire f_1 le flux transversal s'ajoute au flux principal du pôle, alors qu'au bec f_2 les flux s'opposent, d'où torsion du flux principal des pôles.

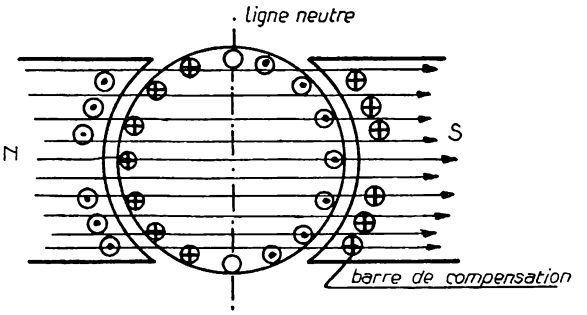


FIG. II-19. — Les barres de compensation logées dans les épanouissements polaires sont parcourues par un courant dirigé dans un sens opposé à celui qui traverse les conducteurs de l'induit qui leur font face. Ce dispositif annule le flux transversal, quelle que soit la charge de la machine, car les barres de compensation et les conducteurs de l'induit sont en série. En effet, si le flux augmente dans l'induit, il augmente également dans les barres de compensation.

Le champ résultant n'est donc plus uniforme dans l'induit : on constate une distorsion du flux qui est d'autant plus grande que le courant dans l'induit est plus important.

Cette distorsion du flux, qui provoque une baisse de la tension induite dans les conducteurs placés sous les becs polaires f_2 et f_3, n'est pas compensée par l'augmentation de la F.E.M. dans les conducteurs placés sous les becs f_1 et f_4, du fait de la saturation du circuit magnétique en ces points.

On supprime la distorsion du flux dans l'induit en plaçant, dans les épanouissements polaires, des conducteurs de forte section parcourus par le courant de l'induit.

Ce courant doit avoir un sens opposé au courant qui traverse les conducteurs de l'induit, qui leur font face.

Par ce procédé, on annule le flux transversal et, par répercussion, la distorsion du flux principal.

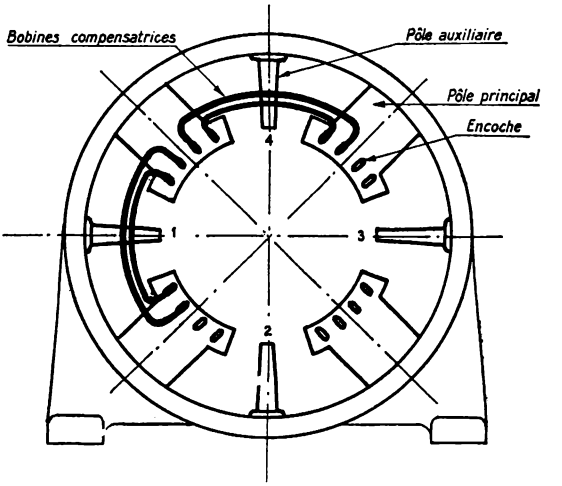


FIG. II-20. — Coupe d'un circuit magnétique à 4 pôles auxiliaires et principaux. On remarque que ces derniers comportent des encoches pour loger l'enroulement de compensation. La moitié de cet enroulement est représentée en place, avec les connexions frontales repliées sur les faces latérales.

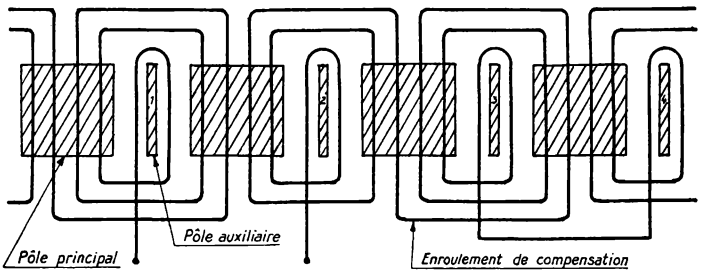


FIG. II-21. — Schéma développé des enroulements, compensateur et auxiliaire, d'un induit tétrapolaire du type de la *figure II-20*, Ces enroulements sont traversés par le courant de l'induit et subissent, de ce fait, les mêmes variations d'intensité que l'enroulement de l'induit. Le courant qui circule dans les pôles compensateurs doit avoir un sens opposé à celui qui existe dans les conducteurs de l'induit placés en face.

L'ensemble de ce dispositif est appelé enroulement de compensation et les conducteurs qui le composent, barres de compensation.

Les machines qui possèdent cet enroulement se désignent sous le nom de dynamos compensées.

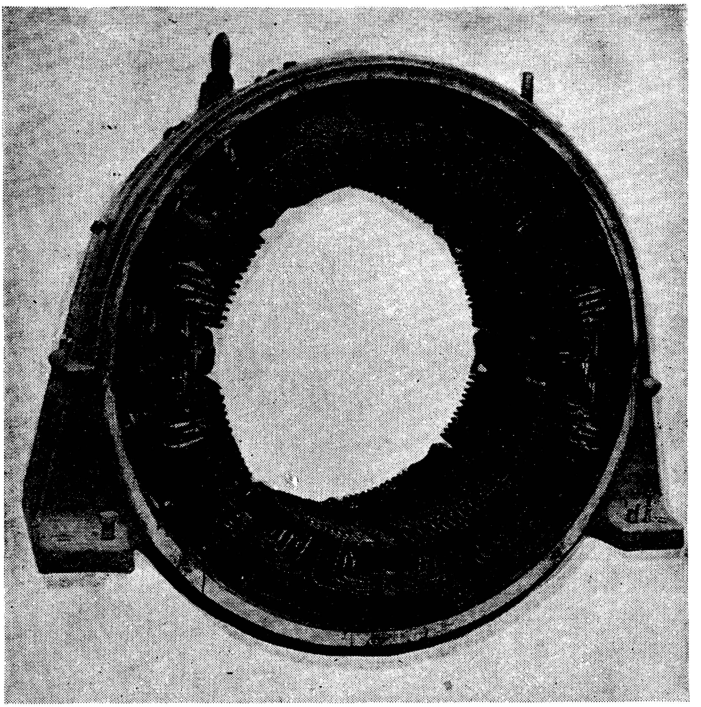


FIG. II-22. — Inducteur de machine à courant continu à 8 pôles avec pôles auxiliaires et compensateurs que l'on voit au premier plan débordant des pôles principaux.

Utilisation.

Cet enroulement est utilisé dans les machines importantes. Il a pour but de s'opposer à une distorsion exagérée du champ résultant, due à la réaction transversale de

l'induit, qui déplace la ligne neutre géométrique de l'induit lorsque la dynamo est en charge.

L'enroulement de compensation permet de réduire le poids de cuivre des pôles principaux et de diminuer l'entrefer.

Un enroulement compensateur est composé de conducteurs en cuivre sous forme de barres capotées (isolées), disposées dans des encoches réparties sur l'épanouissement polaire (*fig. II*-20 *et II*-21).

Ces barres forment des spires concentriques ayant pour centre les pôles auxiliaires. Elles sont parcourues par le courant de l'induit et mises en série avec le bobinage des pôles auxiliaires.

Les connexions frontales sont des U renversés, placés l'un au-dessus de l'autre et soudés sur le bout des barres.

CHAPITRE III

L'INDUIT DES MACHINES A COURANT CONTINU

III,1. LE TAMBOUR D'INDUIT

Constitution.

Il se présente sous la forme d'un cylindre rainé appelé ***tambour d'induit.***

Le tambour est constitué par un empilage de disques dentés, en tôle de 0,5 mm d'épaisseur, isolés par du vernis.

La tôle de fer doux utilisée pour les disques contient 2 à 4 % de silicium, qui limite les pertes par courant de Foucault aux environs de 3 W par kilogramme de tôle,

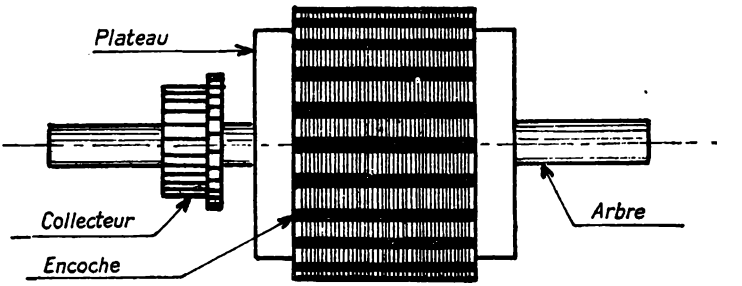


FIG. III-1. — Induit en tambour de machine à courant continu. Les plateaux maintiennent les tôles et servent d'appui au bobinage.

pour une induction de 1 tesla (10 000 G). On emploie cette tôle en raison de sa grande résistivité électrique (0,25 Ω mm²/m).

Les tôles sont livrées dans le commerce avec une largeur maximale de 1 m. Les induits qui ont un diamètre

supérieur sont constitués par un ensemble de segments découpés à l'étampe en même temps que les encoches et les trous qui permettront de les assembler.

Assemblage des tôles.

Il se fait sur l'arbre de l'induit, qui porte une clavette sur toute la longueur du tambour. Un écrou de serrage ou une bague maintient les tôles comprimées entre deux plateaux (*fig. III-1*).

Sur le même arbre est claveté le collecteur, dont l'un des rôles est de relier le bobinage au circuit extérieur par l'intermédiaire des balais.

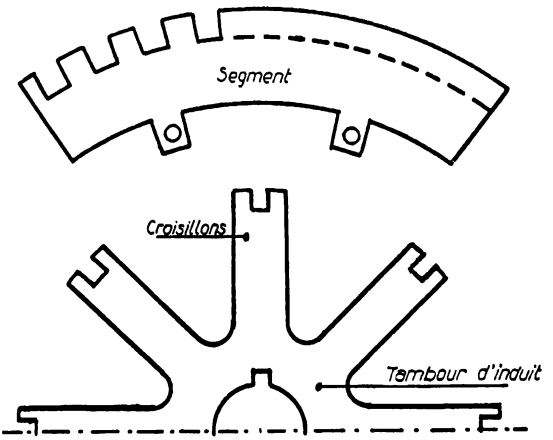


FIG. III-2. — Segment de tôle de la couronne d'un gros induit et son support. Ce dernier comporte un tambour, sur lequel sont répartis des croisillons servant à fixer la couronne de tôles encochées.

Pour les grosses machines, on utilise des segments de tôles, assemblés entre deux anneaux de serrage réunis par des boulons, lesquels passent généralement à travers les tôles. On obtient ainsi une couronne homogène.

La fixation de la couronne obtenue s'effectue sur des croisillons au moyen de tenons à bords parallèles s'emboîtant dans des pièces rainurées.

III,2. LE COLLECTEUR

Constitution.

Il est composé de lames de cuivre profilées, isolées les unes des autres par du mica ou de la micanite dure. Cette dernière est constituée par du mica aggloméré à chaud avec une résine artificielle ou naturelle, susceptible de devenir insoluble et infusible par un traitement thermique approprié.

La résine artificielle est tirée de la réaction de trois molécules d'anhydre phtalique sur deux molécules de glycérine.

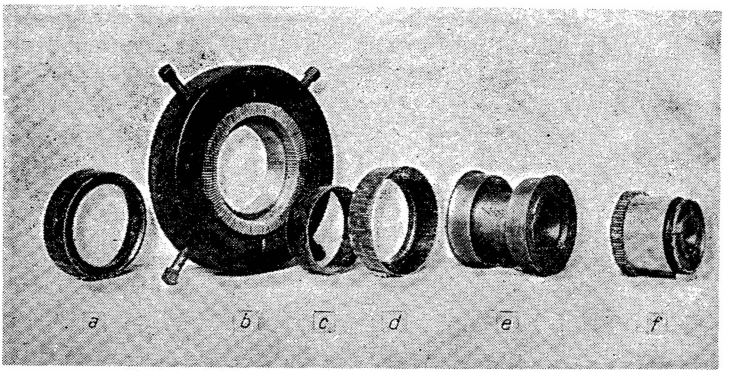


FIG. III-3. — Pièces détachées d'un collecteur de machine à courant continu. *a* et *d*, cônes en micanite; *b*, collier d'assemblage pour le montage du collecteur; *c*, douille isolante en micanite qui se place au milieu de *e* (douille support en acier du collecteur). La bague située à droite est coulissante; elle se bloque avec l'écrou à encoche qui se voit sur la photo; *f*, collecteur terminé. Il est représenté à une plus faible échelle que les pièces détachées.

L'agglomérant naturel est la gomme-laque, qui résulte de la transformation de la sève d'arbustes des Indes par les larves d'un insecte : le liquide résineux rejeté par les larves se solidifie au contact de l'air et constitue la gomme-laque.

Les segments de micanite sont rectifiés à la meule sur leur épaisseur, avec une tolérance de $\pm$ 0,01 mm avant d'être employés au montage du collecteur.

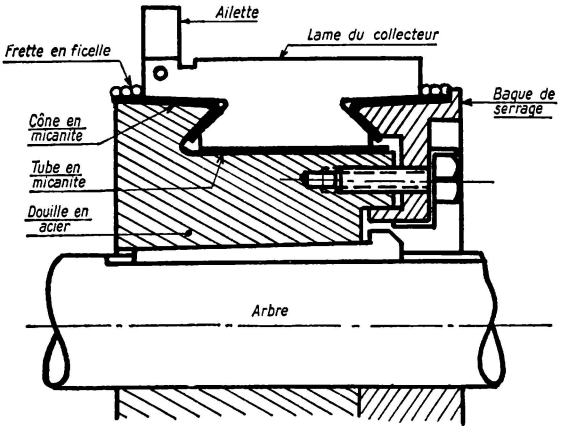


FIG. III-4. — Coupe d'un collecteur et profil d'une ailette.

Assemblage du collecteur.

Pour permettre l'assemblage du collecteur, on le place sur un tour, afin de lui donner intérieurement un profil en queue d'aronde à chaque extrémité (*fig. III-3* et *III-4*).

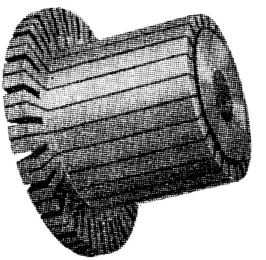


FIG. III-5. — Vue d'un collecteur à lames fraisées pour le logement des entrées et sorties des sections de bobinage.

Blocage du collecteur.

Le blocage s'effectue soit au moyen de vis réparties sur la face avant du collecteur, comme l'indique la *figure III*-4, soit avec une bague taraudée.

Disposition des lames.

Les lames du collecteur sont généralement terminées, du côté bobinage, par une ailette en cuivre étamé, servant de connexion entre faisceaux d'une part et le collecteur d'autre part. Un cavalier en cuivre coiffe l'ensemble qui est ensuite soudé à l'étain. (Voir *fig. VIII*-21).

Certains collecteurs ne possèdent pas d'ailettes, et en particulier les petits modèles. Les conducteurs sont alors logés dans une fraisure effectuée à l'extrémité des lames du collecteur, où ils sont soudés (*fig. III*-5).

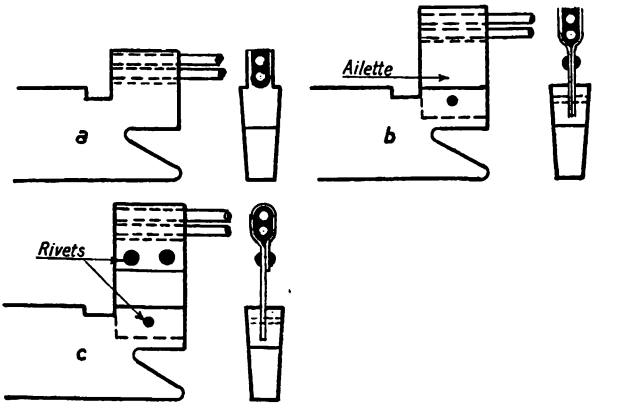


FIG. III-6. — Trois procédés de liaison des sections de bobinage au collecteur :

a) La lame du collecteur est fraisée du côté tambour pour recevoir les connexions.

b) Ailette ouverte en cuivre étamé, soudée et rivée à la lame du collecteur, ou simplement brasée.

La saignée dans la lame se fait au moyen d'un trait de scie oblique ou d'une fraise. Dans les deux cas, on n'obtient pas un ajustement à angle droit comme l'indique les figures *b* et *c*.

c) Ailette fermée au moyen d'un ou deux rivets, soudée et rivée à la lame.

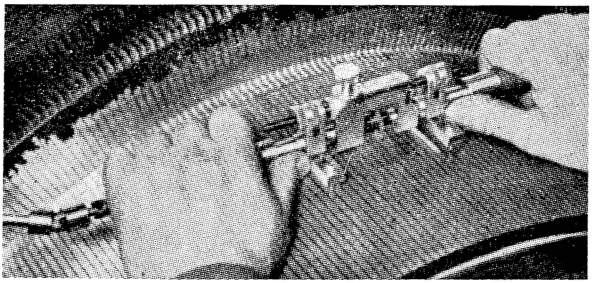


FIG. III-7. — Fraisage des micas d'un collecteur. La fraise est entraînée par un arbre articulé raccordé à un petit moteur électrique, tel le mandrin d'une perceuse électrique.

III,3. LES BALAIS

Emploi.

Les charbons des balais servent de trait d'union entre le bobinage de l'induit et le réseau. Ils doivent pouvoir supporter environ 10 A/cm² de surface de frottement. Avec un bobinage normal, un balai doit couvrir sensiblement la largeur d'une lame et demie du collecteur.

Description.

Les balais sont supportés par des porte-balais, qui peuvent être déplaçables dans le sens du pourtour du collecteur et réglables par rapport à l'éloignement avec celui-ci.

Les balais sont fabriqués soit avec du charbon des cornues du coke de gaz, soit avec de l'anthracite pulvérisée, mélangée à des poudres minérales et agglomérée.

Pour améliorer la conductibilité des balais et assurer un meilleur contact avec les porte-balais, on leur applique un cuivrage par électrolyse.

Que le charbon soit cuivré ou non, le contact entre balais et porte-balais est toujours shunté par un petit câble souple en cuivre.

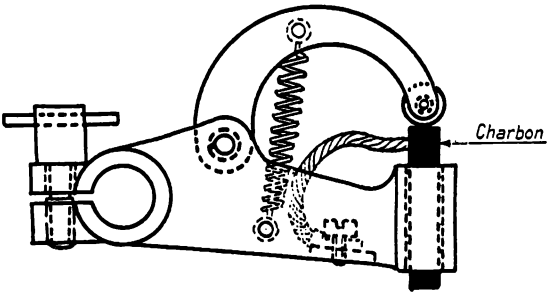


FIG. III-8. — Porte-balai. — Un câble souple relie le charbon au porte-balai pour renforcer la conductance entre l'induit et le circuit extérieur.

Réglage.

Le réglage de la pression des balais doit être fait avec beaucoup de soin et la position de l'ensemble des balais doit couvrir toute la largeur du collecteur, afin d'obtenir une usure régulière de toute sa surface. Pour cela on décale latéralement les balais d'une ligne par rapport à la ligne précédente.

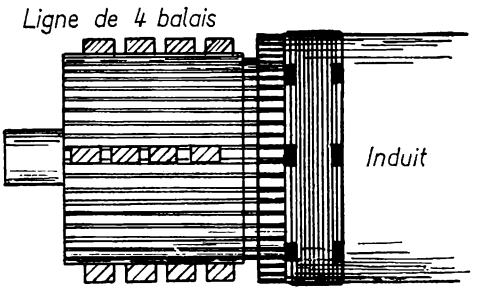


FIG. III-9. — Collecteur d'induit à quatre lignes de balais. La ligne du milieu est décalée vers la gauche par rapport aux deux autres lignes, afin de répartir l'usure du collecteur sur toute sa largeur.

III,4. FORME DES RAINURES OU ENCOCHES

Les rainures pratiquées sur la périphérie des carcasses d'induits de machines à courant continu se présentent sous la forme d'encoches ouvertes et semi-fermées.

L'intervalle compris entre deux encoches se nomme « dent ». Lorsque les rainures sont rectangulaires, les dents sont plus étroites à la base que sur la périphérie.

4,1. Les encoches ouvertes

Elles permettent d'employer des sections gabariées et de placer aisément les faisceaux (*fig. III*-10).

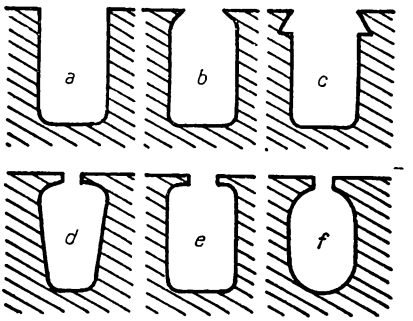


FIG. III-10. — Profils d'encoches :

a : Encoche ouverte rectangulaire;

c : Encoche ouverte à queue d'aronde pour la pose d'une cale ;

b, *d*, *e* : Encoches semi-fermées pour fils égrenés;

f : Encoche semi-fermée pour petites machines.

Le bobinage est maintenu en place par un frettage constitué par une bande de presspahn sur laquelle sont enroulés un certain nombre de tours de fil de laiton ou d'acier étamé, rendus solidaires par une soudure à l'étain.

On dispose ainsi, sur la périphérie de l'induit, plusieurs frettes judicieusement réparties (*fig. VIII*-24).

Lorsque le diamètre de l'induit atteint 2 m et plus, on utilise de préférence des encoches à queue d'aronde. Cette dernière sert de logement à une cale en buis ou en isolant, enfoncée en force sur les conducteurs. Ce procédé a, en outre, l'avantage de permettre la diminution de l'entrefer par la suppression du frettage sur le tambour d'induit.

4,2. Les encoches semi-fermées

Ce type d'encoche diminue la réluctance de l'entrefer et permet l'emploi de faisceaux importants qui seront facilement maintenus en place par une cale isolante (*fig. III*-10).

Avec ce genre de rainure, on introduit le fil dans l'encoche en l'égrenant, s'il est rond.

Si l'on utilise un enroulement à barres, celles-ci ne sont pliées que d'un côté, afin de permettre leur mise en place par enfilade.

CHAPITRE IV

ÉTUDE DES ENROULEMENTS IMBRIQUÉS A COURANT CONTINU

IV,1. CONDITIONS NÉCESSAIRES POUR OBTENIR UN ENROULEMENT RATIONNEL

a) ***L'ensemble du bobinage doit être parfaitement symétrique,*** afin d'équilibrer l'induit au point de vue mécanique.

b) ***L'enroulement doit constituer un ou plusieurs circuits fermés*** permettant de parcourir tous les conducteurs du bobinage.

c) ***Ces circuits doivent se composer à chaque instant,*** entre balais de polarités contraires, de 2 *a* parties de F.E.M. égales et en opposition. Ces 2 *a* parties portent le nom de voies d'enroulement. (Voir un exemple *fig. IV-8*).

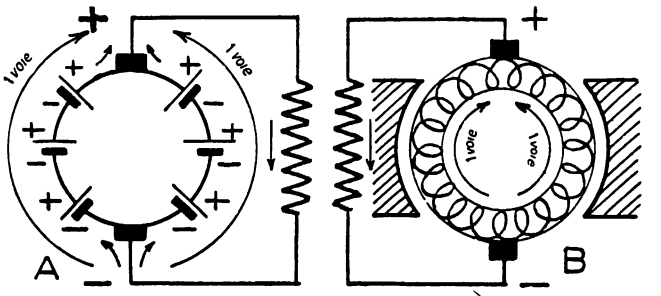


FIG. IV-1. — Analogie entre un groupement de six piles disposées en deux séries parallèles de trois piles chacune et une dynamo bipolaire à induit en anneau. Le courant qui prend naissance dans son bobinage est débité par deux voies d'enroulement comme dans le montage avec les piles.

Les *figures IV*-1 A *et IV*-1 B permettent de se rendre compte comment se répartit le courant dans un groupement de piles en parallèle et, par analogie, dans un bobinage en anneau. Dans ce dernier, l'enroulement doit se composer de deux groupes égaux de spires en opposition comme dans le groupement de piles.

On appelle **voie d'enroulement** l'ensemble des sections d'un induit à collecteur qui, à un instant donné, se trouvent en série entre deux balais consécutifs de signes contraires.

d) ***Dans un induit, le nombre de voies d'enroulement correspond au nombre de circuits dérivés,*** dont les courants s'ajoutent pour fournir le courant extérieur.

Dans une dynamo bipolaire, on a :

$2\ a$ = deux voies d'enroulement.

Dans une dynamo hexapolaire, l'enroulement peut se composer de six voies, soit :

$2\ a$ = six voies d'enroulement.

Ces six voies se répartissent en trois groupes parallèles de deux voies chacun (montage en parallèle, pour un fort débit).

e) ***Le nombre de sections actives doit être égal au nombre de lames du collecteur,*** chacune de ces dernières étant reliée à une entrée et une sortie de deux sections voisines.

f) Chaque rainure ou encoche peut recevoir un ou plusieurs faisceaux, constitués eux-mêmes par un ou plusieurs conducteurs.

IV,2. COMPOSITION D'UNE SECTION D'ENROULEMENT

On appelle section un ensemble de spires dont l'entrée et la sortie sont reliées à deux lames du collecteur (*fig. IV*-2).

— Chaque section comprend une ou plusieurs spires.

— Une spire est formée de deux conducteurs.

— Chaque section *a deux faisceaux*, comprenant un ou plusieurs conducteurs.

— Plusieurs sections peuvent être assemblées sous un enrubannage. On a alors *une bobine.*

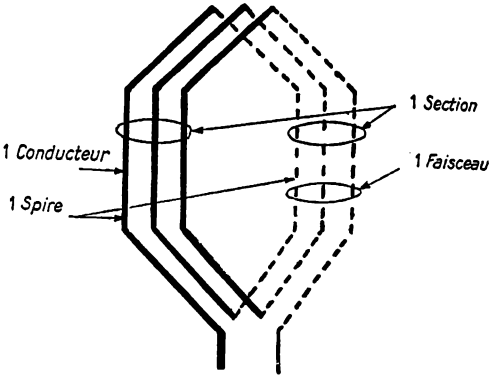


FIG. IV-2. — Constitution d'une section de bobinage comportant trois spires.

IV,3. PROCÉDÉS D'ENROULEMENT

Pour relier entre elles les sections placées sur un induit, on utilise deux procédés *(fig. IV-3).*

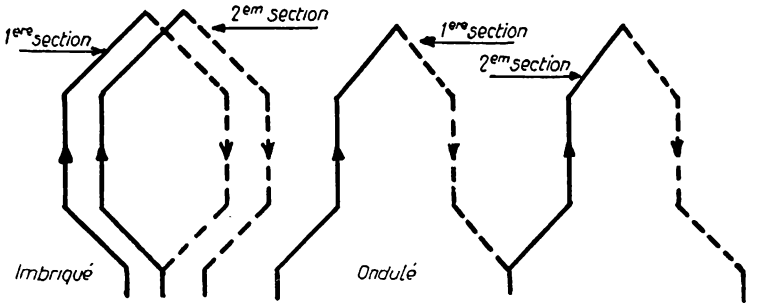


FIG. IV-3. — A gauche, forme et raccordement entre deux sections de bobinage imbriqué. A droite, forme et raccordement de deux sections de bobinage ondulé. Les flèches indiquent comment circule le courant dans les sections dont les extrémités sont soudées sur les lames du collecteur.

Le premier, appelé enroulement imbriqué, ou en quantité, donne un bobinage dont les pas partiels sont de sens contraire avec toutes les sections montées en parallèle dans les encoches (*fig. IV*-4). La sortie d'une section est reliée à l'entrée de la suivante, de façon que toutes les sections forment un circuit ininterrompu sur tout le pourtour de l'induit.

Le deuxième, nommé enroulement ondulé, ou en tension, groupe les sections soit en série, soit en série- parallèle. Les pas partiels sont de même sens.

IV,4. REPRÉSENTATION SCHÉMATIQUE DES ENROULEMENTS

4,1. Par développement panoramique (*fig. IV*-4).

L'induit est supposé fendu suivant une génératrice et développé sur le papier.

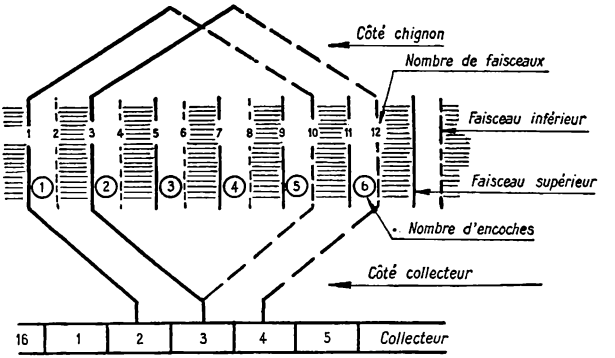

Côté chignon
Nombre de faisceaux
Faisceau inférieur
Faisceau supérieur
Nombre d'encoches
Côté collecteur
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12
16 1 2 3 4 5 Collecteur

FIG. IV-4. — Principe de représentation d'un bobinage imbriqué par développement panoramique.

Les faisceaux sont représentés par des droites parallèles à l'axe de la machine. Les traits pleins figurent les faisceaux supérieurs et les traits ponctués les faisceaux inférieurs.

4,2. Par projection frontale (*fig. IV-5*).

Les faisceaux sont représentés dans leur position réelle sous forme de points équidistants, répartis sur la périphérie de l'induit.

Les connexions côté collecteur sont en traits pleins ; les connexions côté chignon sont en traits pointillés.

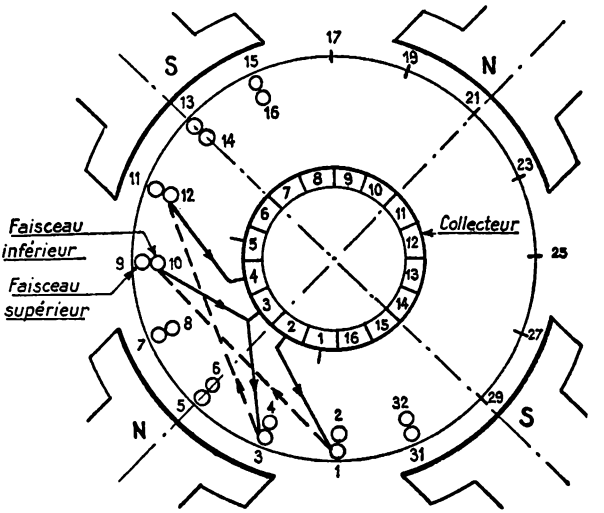


FIG. IV-5. — Le schéma de bobinage par projection frontale représente les faisceaux dans leur position réelle sur l'induit, ce qui facilite le travail du bobineur.

Deux sections seulement sont figurées, afin de montrer la façon d'opérer. Pour terminer ce schéma, il suffit de tracer des traits homologues à ceux existant, en utilisant les encoches libres. On commence le dessin en traçant un cercle, à l'intérieur duquel on répartit les faisceaux sous la forme de petits cercles. Les ronds extérieurs représentent les faisceaux supérieurs. Le faisceau situé au bas de la figure porte le n° 1. C'est de ce cercle qu'on trace la première section en traits coupés. Elle a comme longueur : $Y_1 = 0$ à 9 ou 1 à 10. C'est le pas de la section sur l'induit.

Comme dans la représentation panoramique, on doit aboutir à un faisceau inférieur (numéro pair). Les extrémités de la section sont ensuite réunies au collecteur, en traits pleins, en ayant soin de les centrer afin qu'elles aient la même longueur.

Ce schéma représente les faisceaux vus de face, côté du collecteur.

IV,5. SYMBOLES EMPLOYÉS EN BOBINAGE

$2p$: nombre de pôles.

p : — de paires de pôles.

$2a$: — de voies d'enroulement.

a : — de paires de voies d'enroulement.

N : — total d'encoches.

F : — de faisceaux utilisés.

Y_1 : symbole du pas partiel, ou *pas de la section*, sur l'induit. Il indique, sur un schéma, le nombre d'intervalles compris entre les deux côtés d'une section.

Y_2 : symbole du pas partiel, ou *pas dans le champ*. Il indique, sur un schéma, le nombre d'intervalles compris entre les côtés non correspondants de deux sections réunis à une même lame du collecteur.

Y : désigne le pas résultant. Il donne sur un schéma la progression de l'enroulement. Celle-ci est égale à $Y_1 - Y_2$ dans un bobinage imbriqué, et à $Y_1 + Y_2$ avec un bobinage ondulé.

b : est un nombre entier, arbitraire, aussi faible que possible (généralement 2 et quelquefois 4), que l'on utilise pour le calcul des pas des enroulements imbriqués, lorsque le quotient de $\frac{F}{2a} + 1$ ou $- 1$ n'est pas nombre entier et impair.

Y_c : désigne le pas au collecteur dans un enroulement ondulé. Il représente le nombre de lames du collecteur compris entre l'entrée et la sortie d'une section d'enroulement.

K : nombre de lames au collecteur.

Y_e : pas des connexions équipotentielles.

u : nombre d'enroulements en parallèle dans un bobinage, ou nombre de tours d'armature qu'il faut faire pour parcourir tout l'enroulement dans les bobinages série-parallèle et parallèle-multiple.

IV,6. CARACTÉRISTIQUES DES ENROULEMENTS IMBRIQUÉS OU EN QUANTITÉ

A. — Un bobinage imbriqué se compose d'un certain nombre de sections disposées en parallèle sur un tambour d'induit. Les sections sont ensuite reliées entre elles par l'intermédiaire des lames du collecteur. La sortie d'une section est soudée à l'entrée de la suivante, et ainsi de suite, de façon à réaliser un circuit fermé en utilisant toutes les sections une seule fois (*fig. IV*-8).

B. — ***Si l'enroulement comprend deux faisceaux par encoche, le nombre des encoches est égal au nombre des lames du collecteur et des sections à employer.***

Avec un enroulement à quatre faisceaux par encoche, le nombre de sections et de lames au collecteur est double du nombre d'encoches.

C. — Pour un type déterminé de tambour d'induit de dynamo multipolaire, l'enroulement imbriqué donne à équivalence de conducteurs, la plus grande intensité possible et le minimum de tension.

D. — ***Il y a autant de lignes de balais qu'il y a de pôles.*** Les balais de même polarité sont reliés entre eux au moyen d'une connexion de forte section et débitent en parallèle, s'il s'agit d'une dynamo multipolaire.

E. — Dans un enroulement imbriqué simple, on a :

$$2\ a = 2\ p.$$

On obtient ainsi un enroulement fermé sur lui-même, qui comprend autant de voies d'enroulement (2 a) qu'il y a de pôles (2 p).

F. — Un bobinage imbriqué peut se concevoir également avec des enroulements parallèles simples ou multiples symétriques.

G. — **Les sections peuvent être à pas diamétral, raccourci, ou allongé.**

1° Le pas diamétral.

On appelle pas diamétral un pas égal au pas polaire (nombre d'encoches logées sous l'influence d'un pôle). Dans ce cas la section a un pas égal à la distance séparant 2 lignes neutres consécutives. Dans un induit bipolaire, le pas polaire comprend la moitié des encoches.

Pour que la section puisse être exactement au pas diamétral, il faut nécessairement que le nombre des rainures soit pair.

Si le nombre d'encoches est impair, le pas ne peut être diamétral, il diffère d'un demi-pas dentaire.

Le pas diamétral est également appelé pas entier, ou pas normal.

2° Le pas raccourci.

Quand le pas est raccourci, l'embrassement de la section est réduit d'une ou plusieurs encoches.

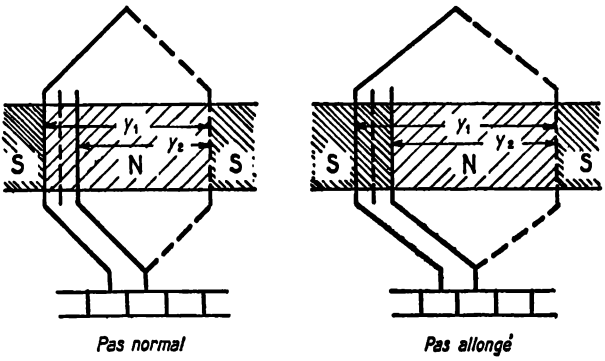


FIG. IV-6. — Dans un pas raccourci à sections ouvertes, le pas partiel Y_1 peut avoir un pas égal au pas polaire et le pas partiel Y_2 un pas inférieur (figure de gauche).

Avec un pas allongé, Y_1 est toujours supérieur au pas polaire ; Y_2 peut être égal au pas polaire.

Le raccourcissement du pas diminue la longueur des connexions frontales, ce qui réduit le poids du cuivre utilisé, et par conséquent les pertes par effet Joule. Par contre, le pas raccourci diminue le flux embrassé par la section, et par suite la F.E.M. de la machine.

3° *Le pas allongé.*

Le pas allongé augmente la longueur des connexions frontales et par conséquent le poids du cuivre des sections par rapport aux deux autres procédés pour un résultat électrique identique à celui obtenu avec un pas raccourci. Le pas diamétral est conseillé chaque fois qu'il est réalisable.

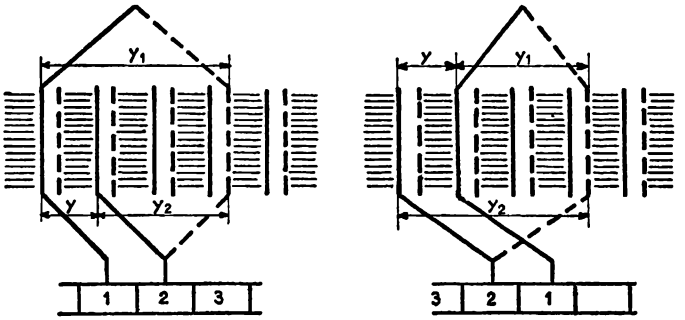


FIG. IV-7. — Représentation schématique des pas partiels Y_1 et Y_2 et du pas résultant Y d'un enroulement imbriqué d'induit de machine à courant continu. Dans la figure de gauche, on remarque que le pas Y_2 est inférieur à Y_1. La section est dite « ouverte », l'enroulement est progressif, c'est la disposition employée couramment. On a $Y = Y_1 - Y_2$.

Dans la figure de droite, la section est dite « croisée ». Y_2 est supérieur à Y_1 d'où $Y = Y_2 - Y_1$, la progression se fait de droite à gauche, l'enroulement est rétrograde. Cette disposition est adoptée par certains constructeurs afin de faciliter la réparation des induits. En effet, la mise au collecteur à sections ouvertes nécessite moins de longueur, ce qui permet, dans le cas d'une avarie au collecteur, de réutiliser les anciennes sections employées sous la forme croisée. Le pas de la section ne change pas dans ce cas.

Cette modification de la mise au collecteur provoque un changement de polarité aux bornes de la machine.

H. — **Pour calculer le pas d'enroulement,** on utilise les formules suivantes :

$Y = Y_1 - Y_2$ en imbriqué et $Y = Y_1 + Y_2$ en ondulé.

Y_1 et Y_2 sont les pas partiels et Y le pas résultant (*fig. IV-7*). ***Y_1 indique le pas de la section sur l'induit.*** Dans un schéma de bobinage imbriqué, on le désigne sous le nom

de *« pas avant »*. Il donne le nombre de faisceaux compris entre les deux côtés d'une section et ne peut être raccourci s'il est égal au pas polaire ou diamétral.

Y_2 donne le pas dans le champ. On le nomme *« pas arrière »* dans un enroulement imbriqué. Il indique sur un schéma le nombre d'intervalles compris entre les côtés non correspondants de deux sections réunies à une même lame du collecteur. Y_2 est généralement inférieur ou égal au pas polaire (*fig. IV*-6).

Y est le pas résultant. Il donne la progression de l'enroulement, qui est égale à deux faisceaux dans un enroulement imbriqué simple.

I. — Le nombre des sections d'un enroulement est toujours égal au nombre des lames du collecteur, quel que soit le nombre de faisceaux placés par encoche.

J. — Les enroulements imbriqués peuvent s'exécuter :

— ***avec des sections ouvertes,*** qui donnent un enroulement progressif ou avançant, généralement employé;

— ***avec des sections croisées,*** qui donnent un enroulement rétrograde ou retardant (rarement utilisé).

K. — Selon que l'on utilise le bobinage à sections ouvertes ou croisées, on a une polarité différente aux bornes de la dynamo si celle-ci fonctionne en génératrice, et un sens de rotation inversé si elle est utilisée en moteur.

IV,7. CALCUL DES PAS D'UN ENROULEMENT IMBRIQUÉ

Pour le calcul des pas représentés sur un schéma, il y a lieu de tenir compte du nombre de faisceaux à utiliser et du nombre de pôles. Le nombre d'encoches et de lames n'intervient pas à priori dans la formule.

Pour le calcul d'un pas normal bipolaire, on écrit les formules générales :

$$Y_1 = \frac{F}{2\,p} + 1 \text{ (pas avant), nombre entier et impair;}$$

$Y_2 = \frac{F}{2p} - 1$ (pas arrière), nombre entier et impair ;

$Y = Y_1 - Y_2$ (pas résultant), nombre pair ;

F représente le nombre de faisceaux à placer sur l'induit ;

$2p$ désigne le nombre de pôles que l'induit devra avoir.

Y_1 et Y_2 doivent être des nombres entiers et impairs. En effet, Y_1 et Y_2 ne peuvent être composés de fractions de faisceaux d'une part et, d'autre part, ces nombres ne peuvent être pairs du fait que l'on compte 0 en partant du premier faisceau. Ainsi (*fig. IV*-8), pour $Y_1 = 11$, on compte 0 sur le faisceau 1, ce qui fait 11 sur le faisceau 12.

Pour $Y_2 = 9$, on part du faisceau 12 en comptant 0 et on rétrograde de 9 pour arriver au faisceau 3.

$+ 1$ et $- 1$ donnent le pas résultant Y, soit 2, dans un enroulement imbriqué simple, de sorte que l'on peut remplacer la formule $Y_2 = \frac{F}{2p} - 1$ par $Y_1 - 2$.

7,1. Cas de Y_1 fractionnaire ou impair

Lorsque le quotient de $\frac{F}{2p}$ n'est pas un nombre entier ou qu'il est un nombre impair, ce qui donne avec $+ 1$ ou $- 1$ un nombre pair, on emploie les formules suivantes :

$Y_1 = \frac{F \pm b}{2p} + 1 =$ (nombre entier et impair) ;

$Y_2 = \frac{F \pm b}{2p} - 1 =$ (nombre entier et impair).

b est un nombre pair arbitraire aussi faible que possible, destiné à donner pour quotient un nombre entier et pair. On commence par prendre $b = 2$, puis, si le résultat ne correspond pas à une solution satisfaisante, on prend $b = 4$.

En utilisant Y_1 et Y_2 avec $(+ b)$, le pas est dit « allongé », soit :

$$Y_1 = \frac{F + b}{2p} + 1 \qquad \text{et} \qquad Y_2 = \frac{F + b}{2p} - 1.$$

Le pas est dit « raccourci » si on prend $(- b)$, soit :

$$Y_1 = \frac{F - b}{2p} + 1 \qquad \text{et} \qquad Y_2 = \frac{F - b}{2p} - 1.$$

Le résultat est le même quant au fonctionnement de la machine, mais les sections nécessitent davantage de cuivre avec le pas allongé. La section ayant ses deux faisceaux plus écartés, les demi-connexions sont plus longues.

IV,8. EXEMPLE D'APPLICATION D'UN ENROULEMENT IMBRIQUÉ A QUATRE POLES A PAS Y_1 DIAMÉTRAL

L'induit d'un moteur a 20 encoches, 20 lames au collecteur, 20 sections (*fig. IV*-8 et *fig.* IV-9).

Calcul des pas :

20 sections = 40 faisceaux, d'où :

$$Y_1 = \frac{F}{2\,p} + 1 = \frac{40}{4} + 1 = 11 \text{ (pas avant).}$$

$$Y_2 = \frac{F}{2\,p} - 1 = \frac{40}{4} - 1 = 9 \text{ (pas arrière).}$$

$$Y = Y_1 - Y_2 = 11 - 9 = 2 \text{ (pas résultant).}$$

Y_1 et Y_2 sont impairs et entiers et Y est un nombre pair. L'enroulement est réalisable avec un pas Y_1 diamétral.

8,1. Exemple d'application d'un enroulement imbriqué à pas raccourci

L'induit comporte 22 encoches, 22 lames au collecteur, 22 sections, 4 pôles.

Calcul des pas :

22 sections = 44 faisceaux.

$$Y_1 = \frac{F}{2\,p} + 1 = \frac{44}{4} + 1 = 12.$$

$Y_1 = 12$ est un nombre pair. Il ne convient pas, car nous retomberions sur un faisceau supérieur; le bobinage est irréalisable ainsi. Dans ce cas, nous utiliserons la deuxième formule, soit :

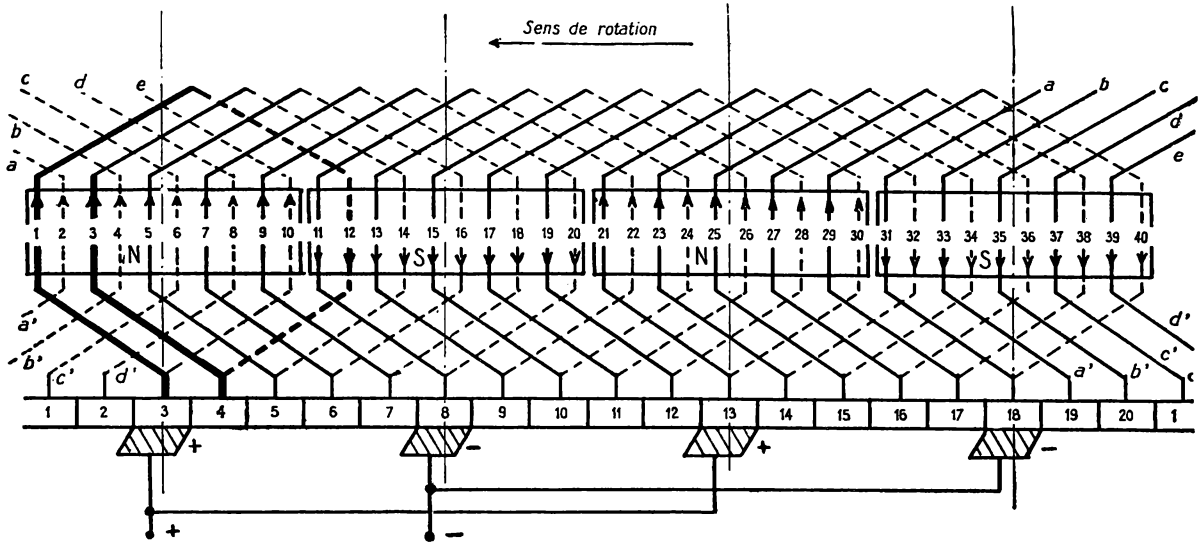


FIG. IV-8. — Schéma par développement panoramique d'un enroulement d'induit imbriqué à 4 pôles, 20 encoches, 20 lames au collecteur, 20 sections. $Y_1 = 11$; $Y_2 = 9$; $Y = 2$.

Dans ce schéma, on remarque :

1° Que le courant s'inverse alternativement sous chaque pôle nord et sud, comme l'indiquent les flèches des faisceaux;

2° Que les balais calés dans l'axe des pôles sont reliés à des faisceaux dont le sens de courant est le même, ce qui indique que l'emplacement choisi pour les balais est bon. Partout ailleurs, on aurait des faisceaux à sens de courant différent.

3° Le sens du courant dans les faisceaux est donné par la règle des trois doigts de la main droite s'il s'agit d'un moteur comme dans le cas de ce schéma.

4° Les repères *a*, *b*, *c*, etc..., permettent de suivre facilement le circuit du bobinage, les mêmes lettres réunissant les conducteurs *a'*, *b'*, *c'* etc... entre eux.

5° Les balais de même polarité sont reliés entre eux (voies d'enroulement en parallèle).

$$Y_1 = \frac{F + b}{2\,p} + 1 = \frac{44 + 4}{4} + 1 = 13 \text{ (pas avant allongé)}$$

et $$Y_2 = 13 - 2 = 11;$$

l'enroulement est réalisable.

Remarque. — On prend $+ b = 4$, car avec $+ b = 2$, on n'obtient pas un nombre entier comme quotient.

D'autre part, en prenant $- b = 4$, on a (*fig. IV*-10) :

$$Y_1 = \frac{44 - 4}{4} + 1 = 11 \text{ (pas avant raccourci);}$$

$$Y_2 = \frac{44 - 4}{4} - 1 = 9 \text{ (pas arrière);}$$

$$Y = 11 - 9 = 2 \text{ (pas résultant).}$$

L'enroulement est également réalisable, car Y_1 et Y_2 sont impairs et Y pair.

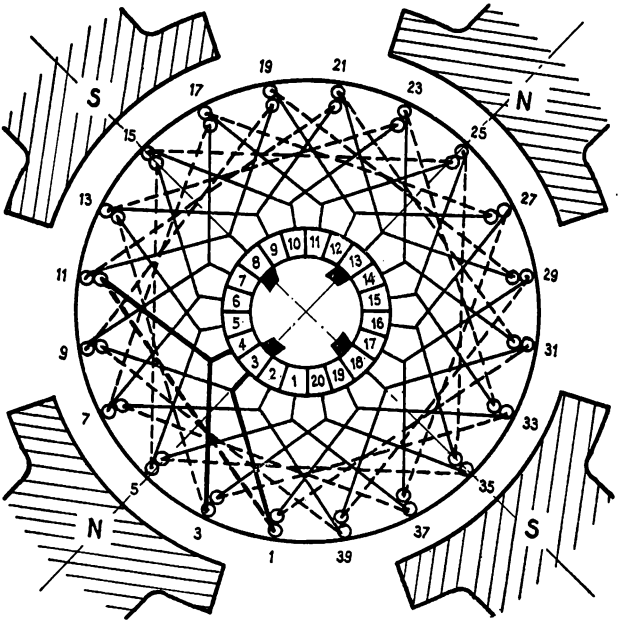


FIG. IV-9. — Présentation frontale du schéma de la figure précédente qui comporte 4 pôles, 20 encoches, 20 lames au collecteur, 2 faisceaux par encoche, enroulement imbriqué simple.

IV,9. EXÉCUTION D'UN SCHÉMA PANORAMIQUE

1° On commence par tracer 20 traits pleins alternés avec 20 traits discontinus. Les traits pleins représentent les faisceaux supérieurs et les traits discontinus les faisceaux inférieurs, en prenant comme exemple la figure *IV*-8.

2° On numérote tous les faisceaux.

3° ***On trace la première section*** en comptant 0 sur le faisceau 1 pour arriver à 11 sur le faisceau 12. On relie ces deux faisceaux à leur partie supérieure, ce qui donne Y_1.

Pour obtenir Y_2, on compte 0 sur le faisceau 12 et on rétrograde de 9 pour arriver au faisceau 3. En réunissant ces deux faisceaux par le bas, on obtient le pas dans le champ que l'on joint, par son centre, à une lame du collecteur.

On trace en traits forts les faisceaux représentant Y_1 et Y_2 et le reste du schéma n'est plus qu'une mise en parallèle de toutes les connexions.

4° On trace le collecteur à une distance convenable des faisceaux et on répartit les lames correspondantes, soit 20 ici, l'axe de Y_2 devant rejoindre l'axe d'une lame.

5° ***On répartit les pôles*** sur toute l'étendue du schéma, soit, ici, un pôle pour 10 faisceaux.

6° On dessine des flèches alternées sous chaque pôle pour indiquer le sens du courant dans les faisceaux.

7° ***Les balais se placent dans l'axe des pôles.***

8° Le sens de rotation peut s'indiquer en utilisant la règle des trois doigts sous un pôle, pour que la dynamo fonctionne soit en moteur, soit en génératrice. On admettra que le champ représenté par le pouce entre par les conducteurs du pôle et sort des conducteurs du pôle sud (*fig. I*-1 et *I*-2).

9,1. Mise en place des sections dans les encoches

Sachant que l'on a : $Y_1 = 11$, soit 12 faisceaux et que, d'autre part, on a 2 faisceaux par encoche, le pas des

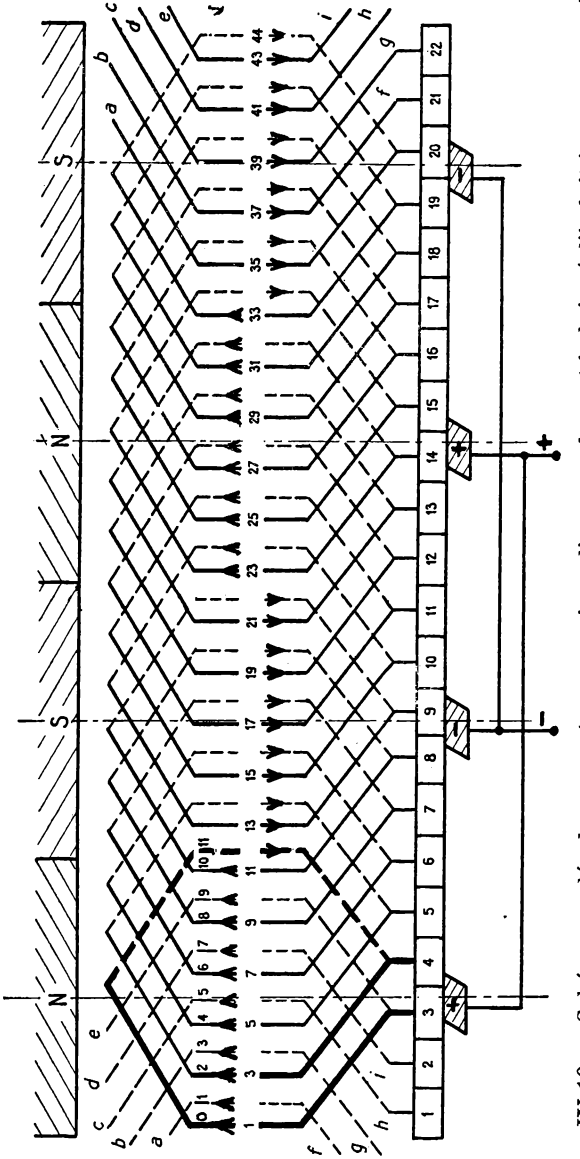


FIG. IV-10. — Schéma par développement panoramique d'un enroulement imbriqué d'induit à pas raccourci, comprenant : 4 pôles, 22 encoches, 22 sections, 22 lames au collecteur.

$Y_1 = 11$; $Y_2 = 9$; $Y = 2$ (Voir les calculs dans le texte).

Pour donner plus de clarté au schéma, il est recommandé de renforcer le trait de la première section. Les balais se placent dans l'axe des pôles et sont reliés en parallèle entre eux pour former un pôle + et un pôle —.

sections dans les encoches sera : $F/2 = 12/2 = 6$, que l'on peut représenter comme suit (*fig. IV*-11):

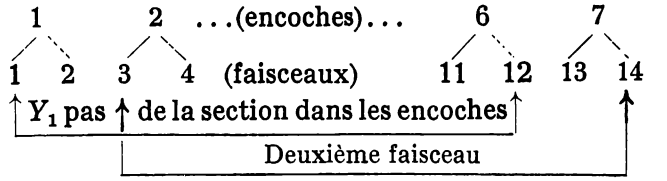


FIG. IV-11.

IV,10. ENROULEMENTS IMBRIQUÉS MULTIPLES

Principe.

Avec ce procédé de bobinage, on multiplie les voies d'enroulement, ce qui permet d'obtenir un grand débit en ampères et une réduction de la F.E.M. fournie par la machine. Cet enroulement peut être exécuté en parallèle double ou triple.

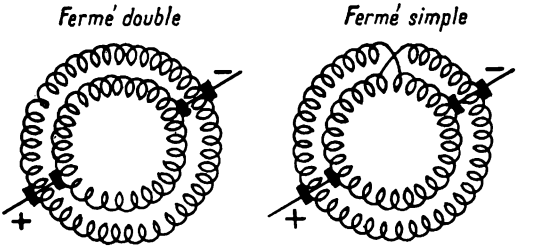


FIG. IV-12. — Représentation analogique de deux enroulements « parallèle double ». Celui de gauche est fermé-double. Il comprend deux bobinages séparés mis en parallèle par les balais. Le dessin de droite a ses deux enroulements en série mis en parallèle par les balais, il est fermé-simple.

Les dynamos bobinées sous cette forme conviennent en particulier pour l'alimentation des électrodes des cuves à électrolyse qui fonctionnent avec quelques volts (4 à 20 V) et une intensité qui peut atteindre plusieurs centaines d'ampères.

10,1. Bobinage parallèle double.

Avec un bobinage parallèle double, on a deux enroulements disposés en parallèle sur l'induit.

Le calcul du pas partiel avant Y_1 d'un tel bobinage se fait comme s'il s'agissait d'un enroulement normal; ce sont les pas Y et Y_2 qui diffèrent.

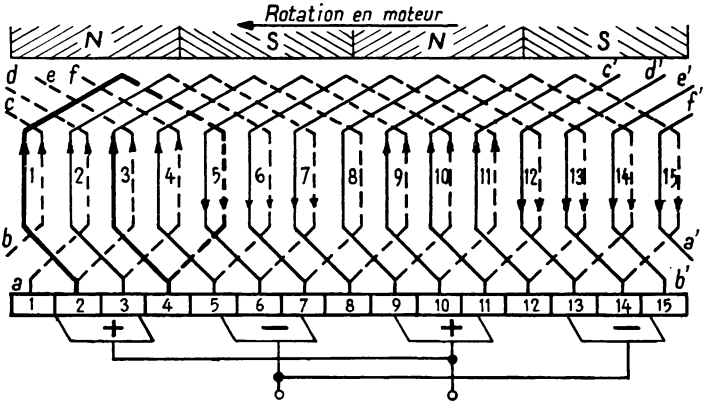


FIG. IV-13. — Enroulement imbriqué parallèle double (fermé-simple) d'un induit de moteur à 4 pôles, 15 sections, 15 lames au collecteur.

$$Y_1 = \frac{30}{4} + 1 = 8{,}5 \text{ (impossible) et } Y_1 = \frac{30 + b}{2p} + 1 = \frac{30 + 2}{4} + 1 = 9 \text{ (possible).}$$

$Y = 4$ et $Y_2 = Y_1 - Y_2 = 9 - 4 = 5$.

En partant de la lame 2 on parcourt tous les faisceaux placés dans les encoches impaires avant de revenir aux encoches paires.

Dans un enroulement ***imbriqué simple,*** $Y = 2$ faisceaux.

Dans un enroulement ***imbriqué parallèle double,*** $Y = 4$ faisceaux.

Dans un enroulement ***imbriqué parallèle triple,*** $Y = 6$ faisceaux.

Avec un enroulement ***parallèle double,*** Y_2 est raccourci de quatre faisceaux au lieu de deux lorsqu'il s'agit d'un enroulement normal.

D'autre part, lors de la mise au collecteur du faisceau inférieur de la première section, on saute une lame comme l'indique la *figure IV-14*, puis on continue avec les autres sections comme s'il s'agissait d'un enroulement ordinaire.

10,2. Bobinage parallèle triple.

Le même raisonnement est valable pour un enroulement parallèle triple, où l'on a trois bobinages en parallèle.

Dans ce cas, on saute 2 lames au collecteur et $Y = 6$.

Pour calculer Y_1, on opère comme pour un enroulement imbriqué simple, en écrivant :

$$Y_1 = \frac{F}{2p} + 1$$

et $Y_2 = Y_1 - Y$, d'où : $Y_2 = Y_1 - 6$ (pour un enroulement parallèle triple), et $Y_2 = Y_1 - 4$ (pour un enroulement parallèle double).

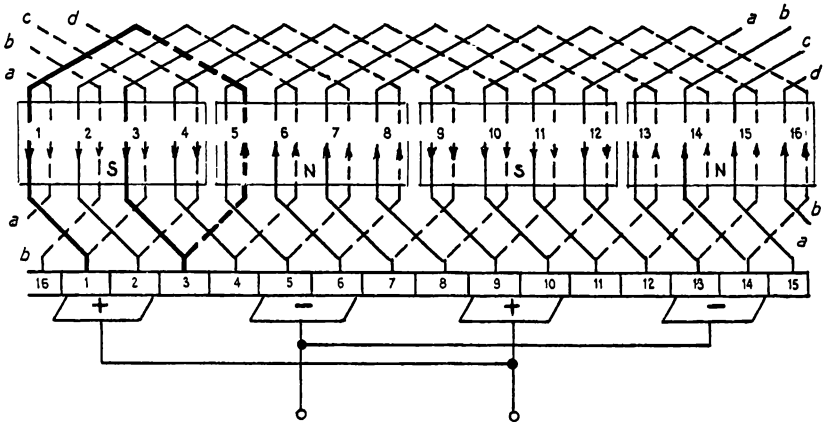


FIG. IV-14. — Enroulement imbriqué parallèle double d'un induit de dynamo tétrapolaire de 16 encoches, 16 sections, 16 lames au collecteur.

$$Y_1 = \frac{32}{4} + 1 = 9; \quad Y = 4; \quad Y_2 = Y_1 - Y = 9 - 4 = 5.$$

Remarque. — L'enroulement se compose de deux circuits en parallèle, (fermé double), K étant un nombre pair. En partant de la lame 1, on suit tous les faisceaux impairs en sautant chaque fois une lame pour terminer par le faisceau *c* qui rejoint la lame 1 du départ. Le deuxième bobinage est formé par les faisceaux pairs.

10,3. Caractéristiques d'un enroulement parallèle-double

L'enroulement parallèle-double peut être fermé simple ou fermé double.

Si le nombre de lames au collecteur est impair, l'enroulement se ferme sur lui-même en parcourant tous les faisceaux. ***C'est un enroulement fermé simple*** (*fig. IV*-13).

Si le nombre de lames au collecteur est pair, l'enroulement se compose de deux bobinages distincts. Les sections des encoches à numéros impairs sont reliées entre elles et forment un premier circuit, tandis que les sections des encoches à numéros pairs constituent le deuxième bobinage. ***C'est un enroulement fermé double*** (*fig. IV*-14).

Le schéma de la *figure IV*-14 comporte 16 lames au collecteur et deux bobinages distincts. Si l'on réalise un enroulement avec 15 lames, le bobinage se ferme sur lui-même.

Dans un enroulement imbriqué multiple, les balais doivent couvrir autant de lames sur le collecteur qu'il y a de circuits en parallèle.

Un enroulement imbriqué multipolaire est normalement muni de connexions équipotentielles; le tambour d'induit doit, de ce fait, comporter un nombre entier d'encoches par paire de pôles, afin d'avoir des faisceaux disposés identiquement sous les pôles de même nom.

D'autre part, on devra avoir un nombre entier avec $\frac{F}{2a}$.

Quand l'intensité débitée est importante, on utilise deux collecteurs, ce qui permet de réaliser ***un enroulement parallèle double,*** à nombre pair de lames au collecteur par paire de pôles.

On obtient ainsi deux circuits indépendants, reliés entre eux par des interconnexions (*fig. IV*-15).

10,4. Exemple d'application d'un enroulement imbriqué parallèle double

Cet exemple concerne un induit de dynamo tétrapolaire comportant : 16 encoches, 16 lames au collecteur, 16 sections (*fig. IV*-14).

Calcul des pas :

16 sections = 32 faisceaux.

$$Y_1 = \frac{F}{2p} + 1 = \frac{32}{4} + 1 = 9 \text{ (pas avant);}$$

$Y = 4$, dans un enroulement parallèle double;

$Y_2 = Y_1 - Y = 9 - 4 = 5$ (pas arrière).

Pas au collecteur. — L'enroulement étant parallèle double, on saute chaque fois une lame au collecteur. Il faudrait en sauter deux si l'enroulement était parallèle triple.

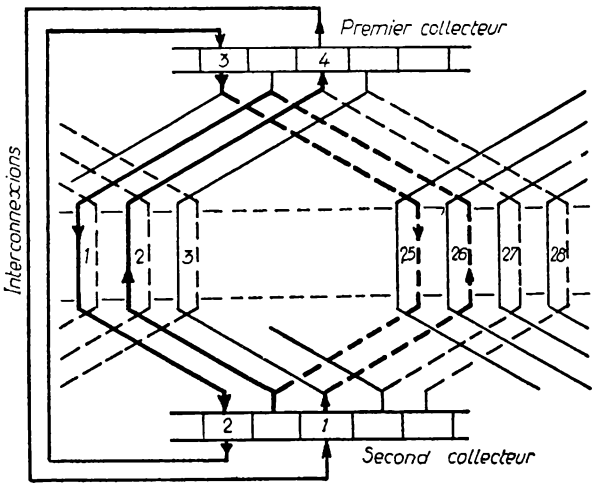


FIG. IV-15. — Schéma partiel d'un enroulement parallèle double à deux circuits distincts et deux collecteurs. Les faisceaux en trait renforcé montrent, en partant de la lame 1 du collecteur, comment circule le courant dans les deux interconnexions.

IV,11. ENROULEMENTS A QUATRE FAISCEAUX PAR ENCOCHE

Principe.

Lorsqu'on a plus de deux faisceaux par encoche, le nombre de lames au collecteur devient supérieur au nombre d'encoches, mais il reste égal à celui des sections.

Le nombre de lames au collecteur est toujours égal à $\frac{F}{2}$.

Dans le cas de quatre faisceaux par encoche, on a un nombre de lames double du nombre de rainures.

Lorsque le bobinage d'un induit comporte un grand nombre d'encoches et de faisceaux, on ne dessine qu'un schéma partiel. Celui-ci permet au bobineur de commencer l'enroulement.

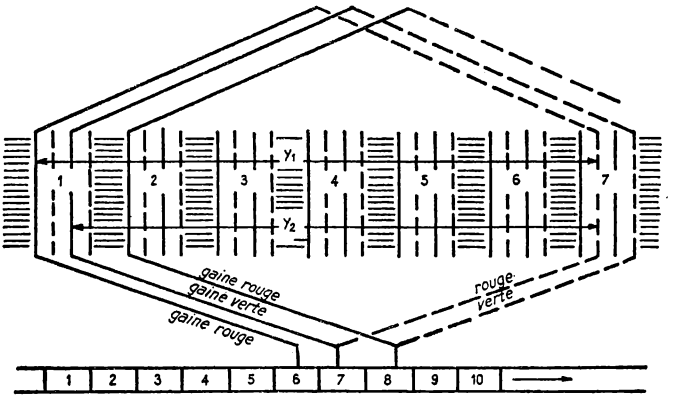


FIG. IV-16. — Représentation partielle d'un bobinage imbriqué comportant des bobines à 2 sections, soit 4 faisceaux par encoche. La figure, telle qu'elle est, permet de voir le pas de la section sur l'induit et la façon de raccorder les entrées et sorties des sections aux lames du collecteur, en utilisant des gaines de couleur différente pour chaque section. Avec ce bobinage, on a deux fois plus de lames que d'encoches.

Réalisation.

Dès que la première section est mise au collecteur, la suite du dessin, ou du bobinage s'il s'agit de la réalisation, n'est plus qu'un travail machinal.

La *figure IV*-16 permet de voir clairement le pas de la section sur l'induit.

Si le bobinage est exécuté au moyen de barres, le travail s'effectue comme pour la réalisation du schéma, sans aucune. différence avec un bobinage à deux faisceaux par encoche

Avec des sections gabariées en manteau, on a plusieurs faisceaux sous le même enrubannage, ce qui nécessite un repérage des entrées et sorties afin de ne pas croiser les sections lors de la mise au collecteur.

Repérage des faisceaux.

Ce repérage s'effectue au moyen de gaines en tresse teintée, passées sur le fil. On choisit une teinte différente pour chaque section, afin d'éviter toute confusion, et on adopte un ordre des couleurs pour la mise au collecteur, comme l'indique la *figure IV*-16, ce qui permet un travail automatique et rapide.

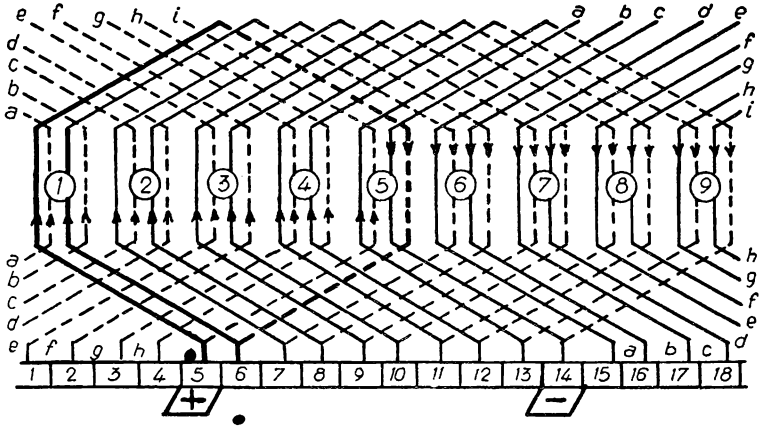


FIG. VI-17. — Schéma de bobinage d'un petit induit de moteur à courant continu comportant : 9 encoches, 18 lames au collecteur, 4 faisceaux par encoche, soit $4 \times 9 = 36$ faisceaux. Enroulement imbriqué bipolaire.

$$\text{Pas } Y_1 = \frac{F}{2p} + 1 = \frac{36}{2} + 1 = 19.$$

$$\text{Pas } Y_2 = \frac{F}{2p} - 1 = \frac{36}{2} - 1 = 17.$$

Ce bobinage ne peut être réalisé qu'avec des barres formées sur deux gabarits différents, à l'exclusion d'un bobinage avec sections. En effet, en partant de l'encoche 1, le faisceau 1 aboutit à l'encoche 5, alors que le faisceau 3 de l'encoche 1 aboutit à l'encoche 6.

On peut se dispenser de ces gaines, mais il faut alors repérer les entrées et les sorties au moyen d'une lampe témoin durant la mise au collecteur, de façon à ne pas intervertir l'ordre des connexions, ce qui pourrait provoquer une coupure dans le bobinage, une inversion de section, ou placer une section en court-circuit.

L'usage d'une lampe témoin ou d'une résistance formant un petit arc nécessite une attention soutenue, et plus de temps dans l'exécution du bobinage.

11,1. Disposition réelle des faisceaux dans les encoches d'un induit

Pour faciliter la réalisation des schémas de plus de 2 faisceaux par encoche, on alterne les faisceaux supérieurs et inférieurs dans les encoches. alors qu'en réalité tous les

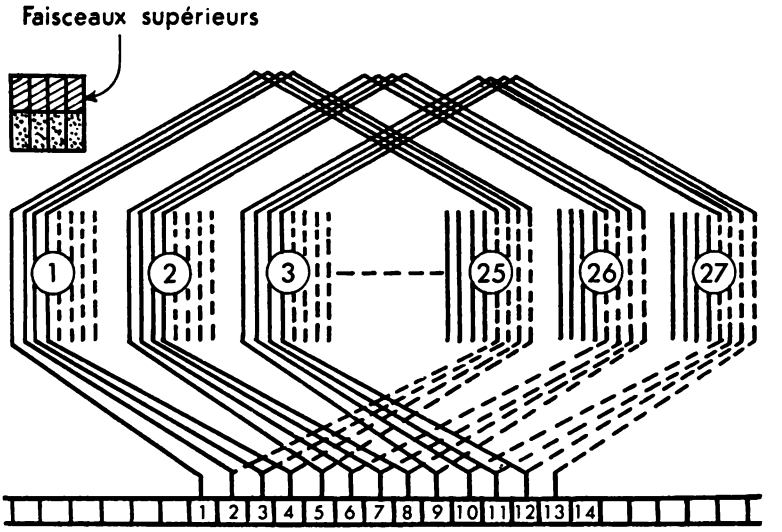


FIG. IV-18. — Disposition des faisceaux de barres dans les encoches d'un induit (en haut à gauche). Les 8 faisceaux sont groupés en une seule bobine, avec faisceaux supérieurs représentés à gauche et faisceaux inférieurs à droite sur le schéma.

faisceaux supérieurs sont groupés (à gauche sur la *figure IV*-18).

Il en est de même pour les faisceaux inférieurs, qu'ils soient en fil ou en barres.

Avec ce bobinage, on a 4 faisceaux, enrubannés ensemble pour former une bobine homogène.

Dans la partie en contact avec les tôles de l'induit, on renforce l'isolement par une capote.

Dans la réalisation pratique des enroulements à bobines à plusieurs sections, on dispose les entrées de fils à gauche de la bobine (faisceaux supérieurs) et les sorties à droite (faisceaux inférieurs). Ces derniers se placent au fond des encoches.

CHAPITRE V

ÉTUDE DES ENROULEMENTS ONDULÉS DES MACHINES A COURANT CONTINU

V,1. CONDITIONS NÉCESSAIRES POUR OBTENIR UN ENROULEMENT RATIONNEL

Les enroulements ondulés sont employés couramment pour les moteurs de petite puissance.

Ces bobinages progressent toujours dans le même sens, de telle sorte que le pas résultant Y est égal à la somme des pas partiels Y_1 et Y_2, d'où :

$$Y = Y_1 + Y_2 \text{ (\textit{fig.} V-1).}$$

Le pas résultant Y est sensiblement égal au double du pas polaire. Chaque section devant se déplacer dans le

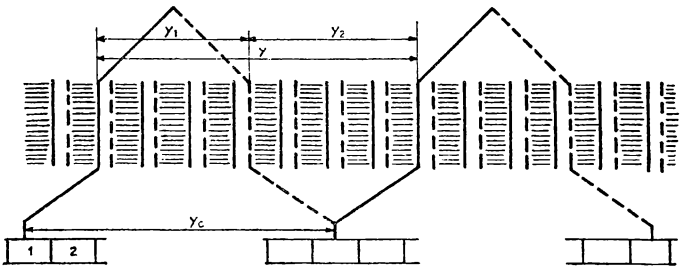


FIG. V-1. — Représentation de deux sections disposées pour effectuer un bobinage ondulé de machine à courant continu. Y_1 est le pas de la section sur le tambour d'induit, Y_2 le pas dans le champ, qui correspond au nombre de faisceaux qui séparent deux sections réunies à une même lame du collecteur. Y est le pas composant; il est égal à la somme de $Y_1 + Y_2$, qui doivent être des nombres impairs. Ces derniers peuvent être égaux ou différents.

champ par rapport à la précédente, cela conduit à avoir un pas Y légèrement inférieur ou supérieur au double du pas polaire.

On appelle pas polaire la distance périphérique comprise entre deux lignes neutres consécutives.

Dans un enroulement ondulé, on doit avoir :

$$\frac{Y}{2} \text{ premier avec } \frac{F}{2} ;$$

Y_1 et Y_2 doivent être des nombres entiers, impairs, égaux ou inégaux. Y doit être pair.

L'enroulement ondulé n'est utilisé que pour des dynamos multipolaires, car, le nombre de voies d'enroulements étant toujours égal à 2, les lignes de balais peuvent être réduites à 2 également.

Un induit bipolaire enroulé en ondulé donne exactement le même résultat qu'un induit imbriqué.

Lorsqu'il s'agit d'un enroulement série simple, on parcourt tous les faisceaux en partant d'une lame du collecteur pour revenir à cette lame.

Après chaque tour de la périphérie de l'induit, on revient à la lame suivante (*pas allongé*) ou à la lame précédente (*pas raccourci*) jusqu'à ce que toutes les lames soient reliées, pour revenir au point de départ.

V,2. CALCUL DES PAS D'UN ENROULEMENT ONDULÉ

Pour vérifier si un bobinage ondulé est réalisable, on écrira :

$$Y = \frac{F \pm 2\ a}{p}.$$

En utilisant le signe +, le pas Y est dit « allongé », il est plus grand que le double pas polaire. Avec le signe —, le pas Y est raccourci.

Le quotient obtenu devra être un nombre entier et pair.

Exemple :

$$Y = \frac{40 + 2}{3} = 14, \text{ nombre pair (pas allongé).}$$

D'où : $Y_1 = 7$ et $Y_2 = 7$.

Les pas partiels sont égaux et impairs.

Dans certains cas, on a Y_1 et Y_2 pairs, quoique Y soit pair.

Exemple :

$$Y = \frac{46 + 2}{3} = 16.$$

D'où : $Y_1 = 8$ et $Y_2 = 8$.

Ces nombres, étant pairs, ne conviennent pas pour la réalisation du bobinage, mais il est possible de les rendre impairs sans changer la valeur de Y en écrivant :

$Y_1 = 9$ et $Y_2 = 7$, ou encore : $Y_1 = 7$ et $Y_2 = 9$.

Dans ces cas, on a des pas partiels inégaux.

En choisissant $Y_1 = 7$ de préférence à $Y_1 = 9$, on a des sections plus étroites, d'où économie de cuivre.

2,1. Rappel de quelques symboles

$2p$ - nombre de pôles.
p - nombre de paires de pôles.
$2a$ - nombre de voies d'enroulement.
a - nombre de paires de voies d'enroulement.
Y_c - pas au collecteur.
K - nombre de lames au collecteur.
u - nombre d'enroulements en parallèle.
N - nombre total d'encoches.

2,2. Différents types d'enroulement ondulé.

Les enroulements ondulés se réalisent sous deux formes :

1° Sous forme **« ondulé série simple »**, avec :

$$2a = 2;$$

2° Sous forme **« ondulé série-parallèle »**, avec :

$$2\ a < 2\ p.$$

Ce dernier enroulement peut se boucler en ne formant qu'un seul circuit quand Y_c et K sont premiers entre eux (voir schéma), il est alors appelé « fermé simple ».

Il peut également être constitué par plusieurs circuits distincts, c'est-à-dire se fermer plusieurs fois lorsque u est le plus grand commun diviseur entre Y_c et K.

Dans la *figure V*-6, on a : $u = 2$, ce qui donne deux enroulements fermés bien distincts (u indique le nombre d'enroulements en parallèle).

Pour éviter l'introduction d'une section morte dans un bobinage, on doit avoir un nombre de sections par encoche premier avec $\frac{p}{a}$.

On appelle « section morte » une section qui n'est pas reliée au collecteur, comme l'indique la figure VI-1.

2,3. Mise au collecteur

Dans un enroulement imbriqué simple, l'entrée et la sortie d'une section sont reliées à deux lames voisines.

Pour un enroulement ondulé série, il y a lieu de calculer le pas au collecteur Y_c. Celui-ci est sensiblement égal aux pas partiels; en effet, dans un enroulement ondulé série-simple, on a :

$$Y_c = \frac{Y_1 + Y_2}{2} \qquad \text{ou encore} \qquad Y_c = \frac{K \pm 1}{p},$$

Dans la première formule, 2 est un chiffre constant quel que soit le nombre de pôles de la machine.

On écrit $K + 1$ quand le pas Y est allongé et $K - 1$ quand il est raccourci.

K = nombre de lames au collecteur, et $Y = Y_1 + Y_2$.

Dans un enroulement série-parallèle, on a :

$$Y_c = \frac{K \pm a}{p}.$$

a = nombre de paires de voies d'enroulement;

p = nombre de paires de pôles.

V,3. ENROULEMENT ONDULÉ SÉRIE SIMPLE

Un enroulement est dit « ondulé série simple » lorsque le nombre de voies d'enroulement est égal à deux, quel que soit le nombre de pôles, d'où :

$$2\ a = 2.$$

C'est l'enroulement qui, pour un nombre de conducteurs bien défini, donne le maximum de tension pour un type déterminé d'induit.

Quel que soit le nombre de pôles, on peut toujours réduire à deux les lignes de balais, l'enroulement ne comportant que deux voies. Dans la pratique, on place autant de lignes de balais qu'il y a de pôles à la machine.

Les moteurs de traction et de levage, dont l'accessibilité au collecteur est difficile, ne possèdent que deux lignes de balais.

Avec ce type de bobinage, K et Y_c doivent être premiers entre eux.

K = nombre de lames au collecteur;

Y_c = pas au collecteur.

3,1. Exemples d'enroulements ondulés, série simple

L'induit d'une dynamo tétrapolaire comporte :

19 encoches, 19 sections, 19 lames au collecteur.

Calcul des pas : $Y = Y_1 + Y_2$, soit :

$$Y = \frac{F \pm 2a}{p} = \frac{38 \pm 2}{2} \begin{cases} Y = \dfrac{38+2}{2} = 20 \begin{cases} Y_1 = 9 \\ Y_2 = 11 \end{cases} \text{ (fig. V-4).} \\ Y = \dfrac{38-2}{2} = 18 \begin{cases} Y_1 = 9 \\ Y_2 = 9 \end{cases} \text{ (fig. V-2).} \end{cases}$$

Choix des pas composants.

Avec $Y = 18$, on a Y_1 et $Y_2 = \dfrac{18}{2} = 9$ chacun. Ce nombre est impair et convient pour cette raison. Les pas partiels Y_1 et Y_2 sont égaux.

Le pas est dit « raccourci »; il est inférieur au double pas polaire. ***Il est dit « allongé »*** dans la première formule, du fait que le signe + a été utilisé.

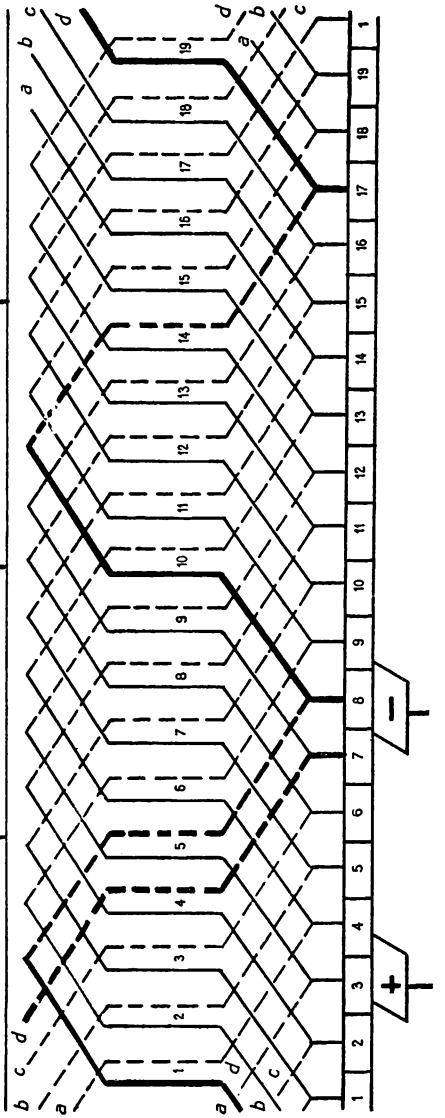


FIG. V-2. — Schéma d'enroulement ondulé série simple d'un induit tétrapolaire comportant 19 encoches, 19 lames au collecteur, 2 faisceaux par encoche.

$$Y = \frac{38 - 2}{2} = 18; \quad (Y_1 = 9 \text{ et } Y_2 = 9); \quad (Y_e = 9, \text{ soit } 1 \text{ à } 10).$$

L'enroulement est raccourci à pas égaux. Le pas raccourci est visible sur la figure. En effet, en partant de la lame 8, on retombe sur la lame 7 après avoir fait un tour complet avec les encoches 10, 14, 19 et 4. Un pas allongé aboutirait à la lame 9.

Avec $Y = 20$, on a Y_1 et $Y_2 = \frac{20}{2} = 10$, qui sont pairs et, de ce fait, ne conviennent pas. Dans ce cas, on les rend impairs en retranchant 1 à Y_1, ce qui donne 9, et on ajoute 1 à Y_2, soit $10 + 1 = 11$.

Le pas résultant Y n'a pas changé : $9 + 11 = 20$.

En principe, on choisit $Y_1 = 9$ de préférence à 11, car avec le pas 9, la section est plus étroite. On réalise ainsi une économie de cuivre, car seules les connexions au collecteur sont allongées.

Pour les induits à barres, le choix est indifférent, car ce qui est gagné sur Y_1 est perdu sur Y_2.

3,2. Réalisation de l'enroulement à pas égaux (*fig. V-2*)

$$Y = \frac{38 - 2}{2} = 18 \quad \begin{vmatrix} Y_1 = 9 \text{ (pas de la section).} \\ Y_2 = 9 \text{ (pas dans le champ).} \end{vmatrix}$$

Calcul du pas au collecteur :

$$Y_c = \frac{Y_1 + Y_2}{2} = \frac{9 + 9}{2} = 9, \text{ soit 1 à 10.}$$

3,3. Mise au collecteur d'un enroulement ondulé

Pour relier les faisceaux au collecteur, on opère pratiquement de la façon suivante :

1° On choisit une section sur le tambour dont on cherche l'axe;

2° On repère la lame du collecteur qui se trouve sur l'axe de la section;

3° Après avoir marqué cette lame, on compte, vers la droite, un nombre de lames égal à la moitié du pas polaire, soit cinq lames, pour un pas de 1 à 10;

4° On raccorde le faisceau inférieur de la section choisie à cette lame;

5° Il ne reste plus qu'à placer tous les faisceaux inférieurs dans l'ordre où ils se trouvent dans les encoches;

6° ***Pour placer les faisceaux supérieurs,*** on prend l'entrée de la première section choisie que l'on reporte dix lames à gauche, ce qui donne un pas $Y_c = 9$, soit 1 à 10 (*fig. V-3*);

7° ***Lorsqu'on rebobine un induit,*** il y a lieu de faire un repère entre la position d'une section quelconque et l'aboutissement des entrées et des sorties de cette section au collecteur. En effet, il se peut que, pour une raison

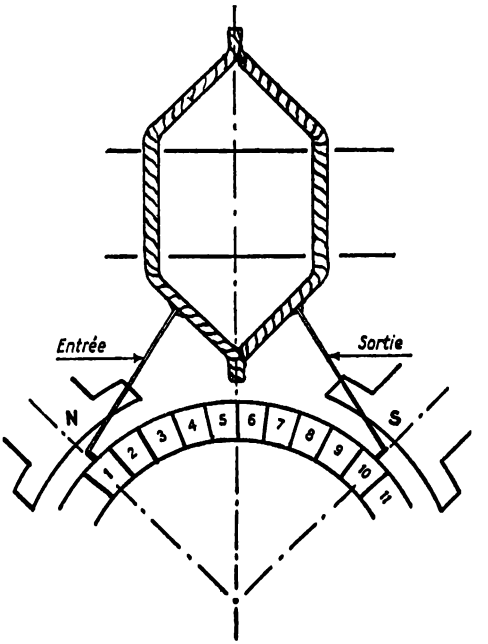


FIG. V-3. — La mise au collecteur d'une section de bobinage ondulé série simple nécessite un calcul du pas au collecteur, soit par exemple :

$$Y_c = \frac{Y_1 + Y_2}{2} = \frac{9 + 9}{2} = 9$$

(soit 1 à 10, car on compte 0 sur la lame de départ).

Les sections étant en place sur l'induit, on reporte l'axe d'une section quelconque sur le collecteur et on connecte son entrée sur la cinquième lame à gauche. La sortie du faisceau inférieur se branche sur la cinquième à droite. C'est cette dernière qui va servir de point de départ pour la mise au collecteur de toutes les sorties des faisceaux inférieurs, puis celles-ci placées, on les recouvre d'une bande d'isolant avant de connecter les entrées des faisceaux supérieurs. On procède à la mise en place des entrées en reprenant l'entrée de la première section (sur laquelle on avait fait un repère) afin de la relier à la lame du collecteur qui était également marquée d'un signe ou d'un coup de pointeau.

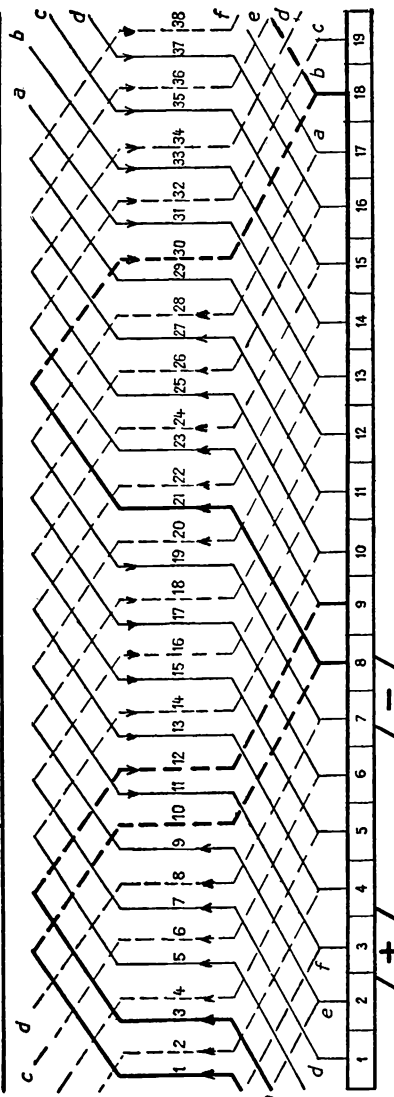


FIG. V-4. — Enroulement ondulé série simple à pas inégaux d'un induit de dynamo tétrapolaire, comportant : 19 encoches, 19 sections, 19 lames au collecteur, avec :

$$Y = 20; \quad (Y_1 = 9); \quad (Y_2 = 11); \quad (Y_e = 10).$$

Le pas est dit « allongé ». En effet, en partant de la lame 8 du collecteur, on aboutit à la lame 9 après avoir parcouru 2 sections (en traits forts) sur la périphérie de l'induit. Avec un pas raccourci, on aboutirait à la lame 7; Y serait inférieur au double pas polaire.

On constate que l'on a bien 2 voies d'enroulement si, en partant de la lame 8 du collecteur, on suit les faisceaux 10 et 21 pour aboutir à la lame 3 où s'appuie le balai +.

Le pas d'encoche Y_1 est égal à 4. En effet, en comptant 0 sur l'encoche 1, on arrive à l'encoche 5 où se trouve le faisceau 10.

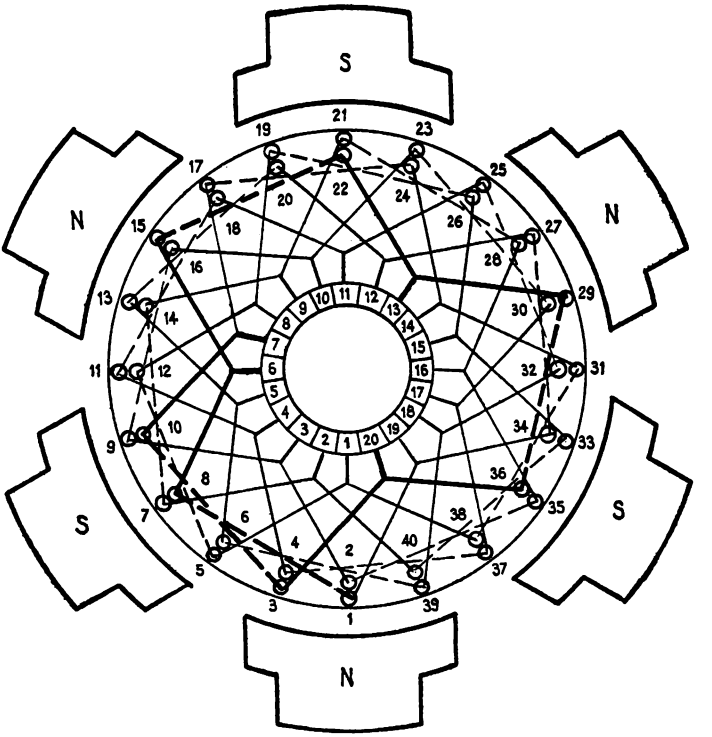


FIG. V-5. — Schéma d'enroulement d'un induit hexapolaire comportant 20 encoches, 20 lames au collecteur, 20 sections. Bobinage ondulé série simple à pas égaux allongés.

$$Y = \frac{F + 2\,a}{p} = \frac{40 + 2}{3} = 14, \text{ d'où } Y_1 = 7 \text{ et } Y_2 = 7.$$

Pas au collecteur $Y_c = \frac{Y_1 + Y_2}{2} = \frac{7 + 7}{2} = 7.$

Pour vérifier l'exactitude du schéma, il suffit de boucler un tour en suivant le trait fort. En partant du faisceau 1, on arrive successivement aux faisceaux 8, 15, 22, 29, 36, 3 et 10, pour aboutir à la lame 7 du collecteur. Cette lame succède à la lame 6 qui a marqué le départ de la première boucle. Le pas est allongé d'une lame pour chaque boucle.

Le schéma est exact ainsi, car, avec un pas raccourci, on aboutirait à la lame 5. Pour terminer le schéma, il suffit de tirer des traits parallèles au trait fort, ce qui ne constitue aucune difficulté pour l'exécution de la figure.

quelconque, la mise au collecteur ne soit pas faite d'après les principes normaux cités précédemment. Dans ce cas, l'enroulement ne répondrait plus aux caractéristiques de la plaque de la machine, si on ne tenait pas compte de cette particularité.

8° Dans tous les cas, on peut constater que la mise au collecteur est exacte en vérifiant si Y_2 est bien réalisé.

En prenant un exemple dans la *figure V-2*, les faisceaux inférieur et supérieur reliés à la lame 8 du collecteur devront être au pas du schéma, soit 1 à 10 faisceaux et 0 à 5 encoches.

3,4. Réalisation du schéma d'un enroulement à pas inégaux.

La *figure V-4* est faite avec les pas composants inégaux $Y_1 = 9$ et $Y_2 = 11$, afin de donner un aperçu de ce genre de bobinage, mais en pratique, il est préférable d'adopter des pas égaux. (Consulter les calculs page 64, sous-titre 3,1).

Pour Y_1, on comptera de 0 à 9 en partant du faisceau 1 pour aboutir au faisceau 10.

Pour Y_2, on comptera 0 sur le faisceau 10 et 11 sur le 21.

Calcul des pas au collecteur :

$$Y_c = \frac{K+1}{p} = \frac{19+1}{2} = 10, \text{ soit de 0 à 10.}$$

On choisit le signe + dans la formule chaque fois que le pas Y est allongé dans le champ. On se sert du signe — lorsque le pas est raccourci. On aurait également pu utiliser la formule :

$$Y_c = \frac{Y_1 + Y_2}{2} = \frac{9+11}{2} = 10.$$

V,4. ENROULEMENTS ONDULÉS SÉRIE PARALLÈLE AVEC $2\,a < 2\,p$.

Ces enroulements sont formés par le groupement en parallèle de plusieurs enroulements en série, ce qui permet de choisir un nombre de voies d'enroulement différent du nombre de pôles, tel que :

$$2\,a < 2\,p.$$

Cette latitude dans le choix du nombre de voies par rapport au nombre de pôles a l'avantage de permettre l'utilisation d'un même type de tambour d'induit pour obtenir des F.E.M. et des intensités adaptées à des besoins industriels variés.

Cette propriété facilite et simplifie l'outillage des constructeurs.

L'utilisation des enroulements ondulés en série parallèle est peu fréquente dans l'industrie, et des connexions équipotentielles sont indispensables avec ces bobinages, qui nécessitent une symétrie de l'enroulement, telle que : $\frac{K}{a}$ et $\frac{p}{a}$ soient des nombres entiers.

D'autre part, le nombre d'encoches doit être divisible par le nombre de paires de voies d'enroulement en parallèle.

Y_1 et Y_2 doivent être impairs. Ils peuvent être égaux ou inégaux.

4,1. Caractéristiques d'un enroulement ondulé série-parallèle.

1° L'enroulement ondulé « série-parallèle » peut se fermer sur lui-même après avoir parcouru tous les faisceaux en sautant chaque fois une lame du collecteur; ***il sera « fermé-simple ».***

Dans ce cas, on a Y_c et K premiers entre eux (*fig. V-7*), $Y_c = 7$ et $K = 26$. Les balais qui couvrent 2 lames permettent le débit en parallèle des deux enroulements, sinon on place autant de lignes de balais que de 2 a.

2° L'enroulement ondulé « série-parallèle » peut être constitué par deux bobinages séparés, en parallèle. ***Dans ce cas, on a un enroulement « fermé-double »,*** avec Y_c et K ayant u (nombre d'enroulements en parallèle) comme plus grand commun diviseur entre Y_c et K.

La *figure V-6* répond à ces conditions; elle comporte deux circuits séparés, avec $Y_c = 8$ et $K = 22$ qui sont divisibles par $u = 2$.

4,2. Règles générales pour la réalisation d'un enroulement ondulé série-parallèle.

L'enroulement est :

— **fermé-simple**, avec Y_c et K premiers entre eux;

— **fermé-double**, si Y_c et K sont divisibles par u.

— Les connexions équipotentielles se placent rationnellement si K/a et p/a sont des nombres entiers.

— **On doit avoir :**

$Y_1 - Y_2 = 4$ avec un enroulement parallèle-double.
$Y_1 - Y_2 = 6$ avec un enroulement parallèle triple.

4,3. Exemple d'application d'un enroulement ondulé série parallèle $2a < 2p$ (*fig.* V-6).

L'induit d'un moteur à courant continu comporte : 6 pôles, 4 voies d'enroulement, 22 encoches, 22 sections, 22 lames au collecteur, 4 lignes de balais qui peuvent être réduites à deux, les balais ayant une largeur suffisante pour appuyer sur deux lames à la fois.

$F = 22 \times 2 = 44.$

Calcul des pas $Y = Y_1 + Y_2$:

$$= \frac{F \pm 2a}{p} = \frac{44 \pm 4}{3} \left| \begin{array}{l} \frac{44+4}{3} = 16 \left| \begin{array}{l} Y_1 = 7 \\ Y_2 = 9 \end{array} \right. \\ \frac{44-4}{3} = 13{,}3 \text{ (n'est pas réalisable).} \end{array} \right.$$

Ce bobinage est réalisable avec $Y = 16$ en rendant Y_1 et Y_2 inégaux.

D'autre part, $\frac{K}{a} = \frac{22}{2} = 11$ est un nombre entier, mais $\frac{p}{a} = \frac{3}{2}$ n'étant pas un nombre entier, les connexions équipotentielles ne seront pas reliées à des points rigoureusement au même potentiel, ce qui rend ce bobinage peu recommandable.

Calcul du pas au collecteur :

$$Y_c = \frac{K \pm a}{p} = \frac{22+2}{3} = 8.$$

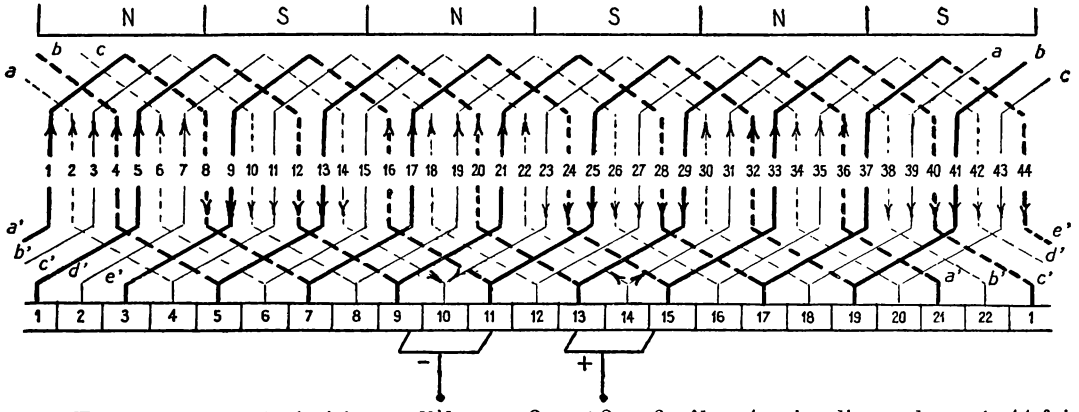


FIG. V-6. — Enroulement ondulé série parallèle avec $2a < 2p$, 6 pôles, 4 voies d'enroulement, 44 faisceaux.

$$Y = \frac{44 + 4}{3} = 16; \quad Y_1 = 7; \quad Y_2 = 9; \quad \text{et} \quad Y_c = 8.$$

Les traits forts permettent de constater facilement que le bobinage comprend deux enroulements distincts se bouclant sur eux-mêmes. Il est (fermé double), car $Y_c = 8$ et $K = 22$ ne sont pas premiers entre eux et $u = 2$ est le plus grand commun diviseur entre Y_c et K.

Les balais doivent couvrir la largeur de 2 lames lorsqu'ils sont réduits à deux, de façon à alimenter 4 voies d'enroulement. On peut constater qu'il existe 4 voies d'enroulement en opérant comme suit :

A partir de la lame 14, en se dirigeant sur le faisceau 31, on parcourt 10 faisceaux pour aboutir à la lame 10. En reprenant la lame 14 pour aller au faisceau 22, on parcourt 12 faisceaux pour arriver à la lame 10 où s'appuie un charbon. Ces deux boucles représentent deux voies d'enroulement. Les deux autres voies en parallèle sont formées par le deuxième enroulement, en trait fort. Elles se vérifient, par exemple, en partant de la lame 15 pour aboutir à la lame 11, sur laquelle on remarque un balai qui embrasse 2 voies en parallèle. Le déséquilibre entre le nombre des faisceaux en série (dix d'une part et douze d'autre part), n'est qu'apparent. En effet, en observant le schéma, on constate que la voie comprenant 12 faisceaux en série a ses faisceaux 15 et 30 sur des lignes neutres, ce qui réduit à 10 le nombre des faisceaux actifs dans cette voie.

Ce bobinage est fermé-double, Y_c et K sont divisibles par $u = 2$.

4,4. Exemple d'un enroulement ondulé série-parallèle avec $2a < 2p$ (*fig. V-7*).

L'induit a 26 encoches et 26 lames au collecteur.

Le bobinage comporte 26 sections, 4 voies d'enroulement et 8 pôles. 26 sections = 52 faisceaux.

Calcul des pas : $Y = Y_1 + Y_2$

$$= \frac{F \pm 2a}{p} = \frac{52 \pm 4}{4} \left| \begin{array}{l} \frac{52+4}{4} = 14 \left| \begin{array}{l} Y_1 = 7 \\ Y_2 = 7 \end{array} \right. \text{ pas allongé} \\ \frac{52-4}{4} = 12 \left| \begin{array}{l} Y_1 = 5 \\ Y_2 = 7 \end{array} \right. \text{ pas raccourci.} \end{array} \right.$$

Les deux combinaisons sont réalisables.

D'autre part : $\frac{K}{a} = \frac{26}{2} = 13$ et : $\frac{p}{a} = \frac{4}{2} = 2$;

$\frac{K}{a}$ et $\frac{p}{a}$ étant des nombres entiers, permettent la pose des équipotentielles indispensables pour ces bobinages.

Pas au collecteur :

$$Y_c = \frac{K \pm a}{p} = \frac{26+2}{4} = 7.$$

Si l'on réalise le bobinage de l'induit avec le pas allongé, l'enroulement se ferme sur lui-même, fermé-simple, $Y_c = 7$ et $K = 26$ sont premiers entre eux (*fig. V-7*).

Au contraire, si l'on choisit le pas raccourci, on a 2 bobinages en parallèle (fermé-double), $Y_c = \frac{26-2}{4} = 6$ et $K = 26$ sont des nombres pairs divisibles par $u = 2$.

V,5. VARIANTE POUR LE CALCUL DES ENROULEMENTS ONDULÉS

Les pas des enroulements **ondulés** peuvent également être déterminés en débutant par le calcul du pas au collecteur.

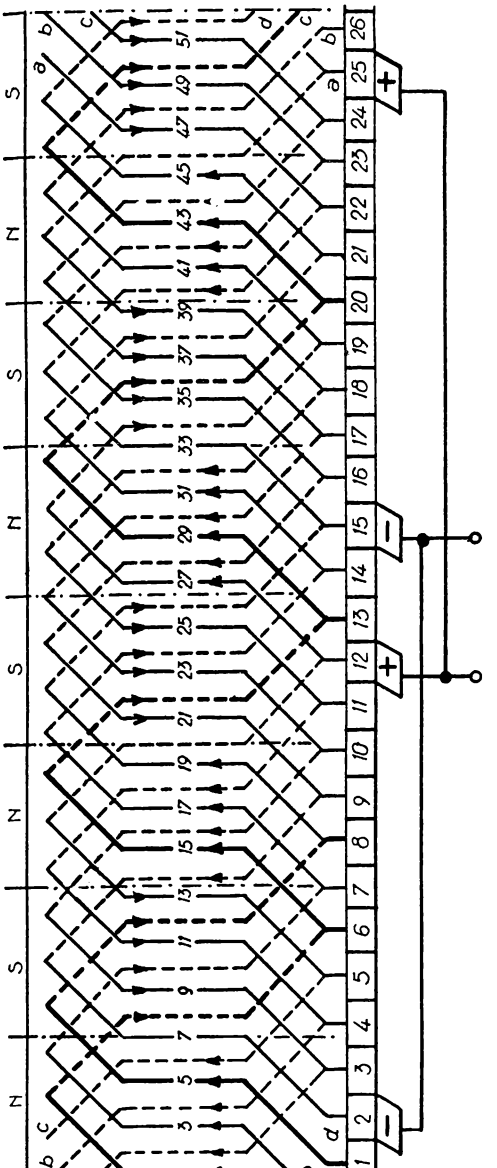


FIG. V-7. — Enroulement ondulé série-parallèle (fermé simple) d'un induit comportant 26 encoches, 26 lames au collecteur, 8 pôles, 4 voies d'enroulement, 2 faisceaux par encoche.

En choisissant un pas allongé, on a :

$$Y = \frac{52 + 2a}{p} = \frac{52 + 4}{4} = 14 \text{ d'où } Y_1 = 7 \text{ et } Y_2 = 7. \quad Y_c = \frac{Y}{2} = \frac{14}{2} = 7.$$

On obtient ainsi 4 voies d'enroulement avec chacune 12 faisceaux actifs en série.

En partant de la lame 12, on a, d'une part, 12 faisceaux actifs (du faisceau 27 au faisceau 52) pour aboutir à la lame 2 (1 voie).

En partant de la même lame, on a 14 faisceaux, mais les faisceaux 40 et 33 étant sur la ligne neutre, il ne reste que 12 faisceaux actifs en arrivant à la lame 15, ce qui constitue la deuxième voie.

Les deux autres voies partent de la lame 25 pour aboutir, l'une à la lame 2, l'autre à la lame 15.

L'enroulement se ferme sur lui-même, de telle sorte que 4 balais sont nécessaires pour recueillir les 4 voies en parallèle.

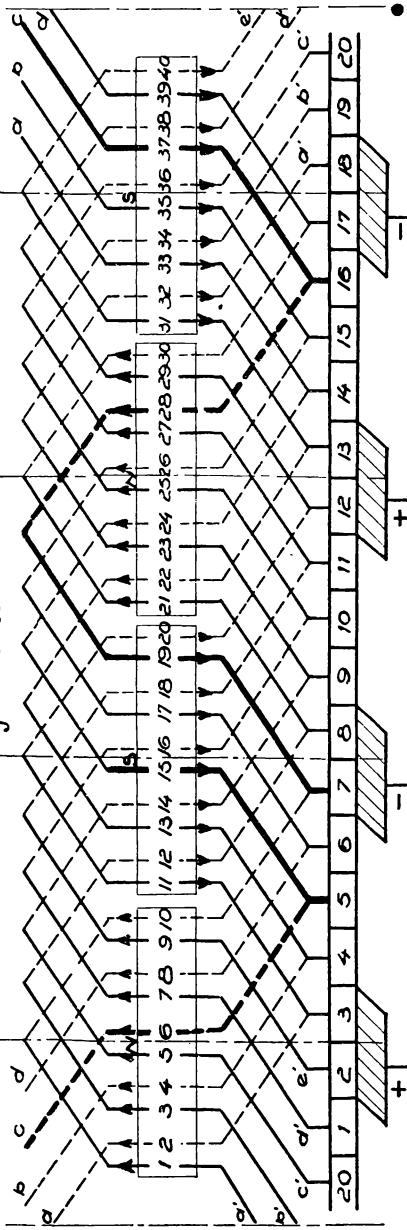


FIG. V-8. — Enroulement ondulé série-parallèle à pas raccourci avec $2a = 4$ et $2p = 4$. L'induit comporte : 20 encoches, 40 faisceaux, 20 lames au collecteur, 4 pôles.

$$Y = \frac{40 - 4}{2} = 18, \text{ d'où } Y_1 = 9 \text{ et } Y_2 = 9.$$

$$Y_c = \frac{K - a}{p} = \frac{20 - 2}{2} = 9, \text{ soit 0 à 9. L'enroulement est « fermé-simple » car } Y_1 = 9 \text{ et } K = 20$$

sont premiers entre eux. On remarque que les balais sont placés dans l'axe des pôles.

En prenant comme exemple l'enroulement ondulé série simple de la *figure V-2* dont l'induit comporte 19 encoches, 19 sections, 19 lames au collecteur, 4 pôles, on a :

Calcul des pas en prenant le pas Y allongé :

$$Y = Y_1 + Y_2 = \frac{F \pm 2}{p} = \frac{38+2}{2} = 20.$$

$$Y_c = \frac{Y_1 + Y_2}{2} = \frac{20}{2} = 10;$$

les pas seront inégaux, soit :

$$Y_1 = 10 - 1 = 9 \text{ et } Y_2 = 10 + 1 = 11.$$

Lorsque Y_c est un nombre impair, on a Y_1 et Y_2 égaux entre eux et égaux à Y_c. Ce cas se présente en prenant le pas raccourci du même induit, soit :

$$Y = \frac{38 - 2}{2} = 18 \qquad \text{et} \qquad Y_c = \frac{18}{2} = 9,$$

d'où :

$$Y_1 = 9 \qquad \text{et} \qquad Y_2 = 9.$$

Les trois pas sont égaux (*fig. V-2*).

Lorsqu'un pas n'est pas réalisable avec la première méthode, il en est évidemment de même avec ce procédé qui ne fait qu'intervertir l'ordre de la recherche des pas.

Exemple : Calcul des pas de l'enroulement ondulé série parallèle de la *figure V-6* en prenant un pas Y raccourci :

$$Y = \frac{44 - 4}{3} = 13{,}3.$$

Le pas, étant fractionnaire, n'est pas réalisable.

Avec Y allongé, on a :

$$Y = \frac{44 + 4}{3} = 16 \qquad \text{et} \qquad Y_c = \frac{16}{2} = 8,$$

ce qui conduit à des pas Y_1 et Y_c inégaux, soit :

$$Y = 16, \text{ d'où } Y_1 = 7 \text{ et } Y_2 = 9.$$

CHAPITRE VI

MACHINES A COURANT CONTINU CAS D'ENROULEMENTS SPÉCIAUX

VI,1. ENROULEMENT DES INDUITS AVEC SECTION MORTE OU FAUSSES BARRES

La multiplicité des types de machines électriques, tant au point de vue puissance que tension de fonctionnement, conduit les constructeurs à rechercher, dans un nombre limité de modèles d'induits, la possibilité de réaliser les bobinages les plus divers.

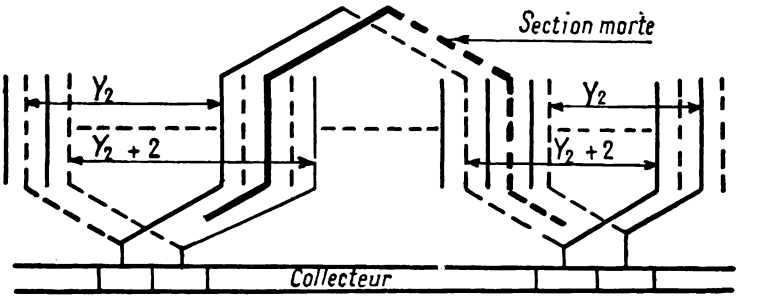


FIG. VI-1. — Disposition d'une « section morte » dans un bobinage. Les extrémités de la section morte ne sont pas reliées au collecteur : elle a un simple rôle de remplissage d'encoches, mais le pas $Y_2 = +2$ faisceaux, lorsqu'un faisceau de la section morte vient s'intercaler dans le pas.

On sait que, pour un nombre déterminé de conducteurs disposés sur un induit, on obtient des tensions et des intensités différentes si on couple les conducteurs, soit sous la forme d'un enroulement imbriqué simple ou multiple, soit sous la forme d'un enroulement ondulé série simple ou série parallèle.

Malgré ces possibilités, il arrive qu'en calculant le pas composant Y d'un enroulement ondulé, on se rende compte que le bobinage recherché n'est pas réalisable, Y se révélant nombre impair. Cela se présente souvent quand il existe plus de 2 faisceaux par encoche.

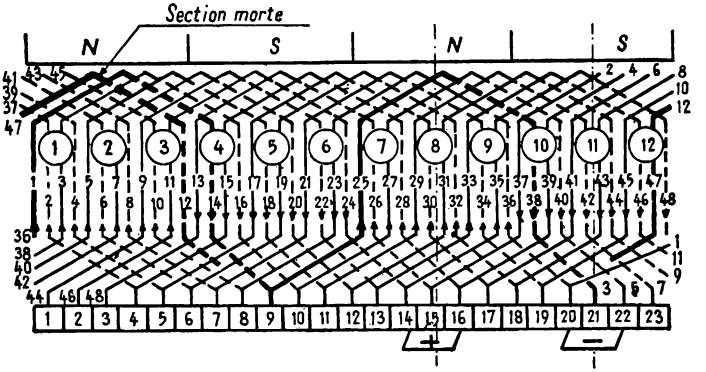


FIG. VI-2. — Enroulement ondulé série simple d'un induit avec « section morte », comportant : 12 encoches, 4 faisceaux par encoche, 46 faisceaux actifs + une section morte, 23 lames au collecteur, 4 pôles, pas allongé.

$$Y = 24;\ Y_1 = 13;\ Y_2 = 11;\ Y_c = \frac{K+1}{p} = \frac{23+1}{2} = 12\ (0 \text{ à } 12).$$

$Y_2 = 13$ lorsque le faisceau de la section morte est dans le pas.

Dans ce cas, on retranche une section (soit deux faisceaux) des calculs, afin de rendre Y pair. Le bobinage est alors réalisable, les faisceaux supprimés sont mis en place, notamment dans le cas d'un bobinage à barres, mais ils ne sont pas raccordés au collecteur : ce sont des « fausses barres » (Voir *fig. VI-1* et *VI-2*).

Quand il s'agit d'un enroulement avec sections gabariées, la section retranchée est appelée « section morte ». Elle peut être remplacée dans les encoches par deux baguettes en bois ou par un isolant tel que la fibre, ou laissée en place pour raison d'équilibrage en coupant l'entrée et la sortie que l'on isole.

1,1. Tracé des schémas avec section morte.

La section morte, qui occupe la place d'une section active sur la périphérie de l'induit, provoque un certain décalage des connexions du bobinage au collecteur, ce qui est normal.

Pour effectuer un tel schéma, on commence par tracer les faisceaux ***et on raccorde la partie supérieure de ceux-ci au pas*** Y_1, puis on répartit symétriquement les lames du collecteur avant de boucler Y_2 (en laissant vides les extrémités d'une « ***section morte*** » choisie au départ).

Il ne reste plus qu'à relier Y_2 au collecteur.

Lors du calcul des pas Y_1 ***sur le schéma, on ne tient pas compte des faisceaux de la section morte,*** par contre on compte 2 faisceaux en plus lorsque Y_2 comprend un faisceau de la section morte.

En pratique, ce genre de bobinage comporte toujours un grand nombre de lames au collecteur, avec plusieurs sections par encoche et des balais couvrant 2 ou 3 lames. Les porte-balais étant très souvent décalables, il n'y a pas lieu, en pratique, de rechercher une très grande précision dans le calage du collecteur lors du bobinage.

1,2. Calcul des pas d'un enroulement ondulé série-simple avec section morte.

L'induit comporte (*fig. VI-2*) : 12 encoches, 24 sections, 48 faisceaux, 4 faisceaux par encoche, 4 pôles, 23 lames au collecteur.

Recherche de la valeur de Y :

$$Y = \frac{F \pm 2a}{p} = \frac{48 \pm 2}{2} \quad \left| \begin{array}{l} \dfrac{48+2}{2} = 25 \\ \dfrac{48-2}{2} = 23 \end{array} \right.$$

Dans les deux cas Y ***est impair;*** le bobinage n'est pas réalisable, mais il devient possible avec une section morte, soit avec 46 faisceaux actifs au lieu de 48.

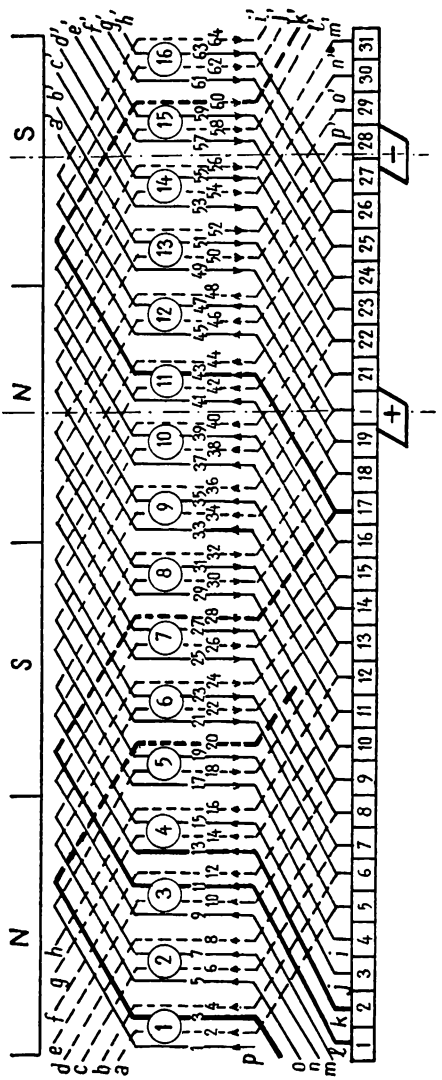


FIG. VI-3. — Enroulement ondulé tension d'un induit de dynamo qui comporte : 16 encoches, 4 faisceaux par encoche, 62 faisceaux actifs + 1 section morte, 4 pôles, 31 lames au collecteur.

Pas allongé : $Y = \dfrac{62+2}{2} = 32$; $Y_1 = 17$; $Y_2 = 15$.

$$Y_c = \frac{K+1}{p} = \frac{31+1}{2} = 16 \text{ soit } 0 \text{ à } 16 \text{ lames.}$$

Avec un pas raccourci, on aurait : $Y_1 = 15$ et $Y_2 = 15$.

$$Y = \frac{46 \pm 2}{2} \quad \left| \begin{array}{l|l} \frac{46+2}{2} = 24 & \begin{array}{l} Y_1 = 13 \\ Y_2 = 11 \end{array} \end{array} \right. \text{ (pas allongé)}$$

$$\left| \begin{array}{l|l} \frac{46-2}{2} = 22 & \begin{array}{l} Y_1 = 11 \\ Y_2 = 11 \end{array} \end{array} \right. \text{ (pas raccourci)}$$

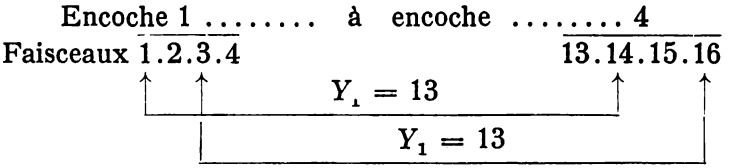
Pas au collecteur $Y_c = \frac{Y}{2} = \frac{24}{2} = 12$, soit 0 à 12 ou 1 à 13.

On adoptera le pas allongé, car, avec ce pas, les 2 faisceaux supérieurs d'une encoche sont reliés à deux faisceaux inférieurs, placés également dans une seule encoche.

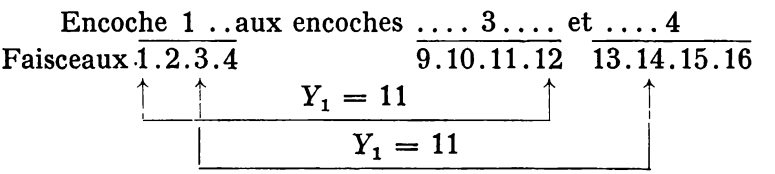
Avec un pas raccourci, ces deux faisceaux inférieurs tomberaient dans deux encoches différentes voisines, ce qui rendrait le bobinage impossible avec des bobines du même gabarit enrubannées par groupe de 2 sections.

Exemples, en prenant le bobinage de la *figure VI-2.*

Avec un pas allongé $Y_1 = 13$ on a un bobinage rationnel, comme l'indique la disposition suivante. Les faisceaux supérieurs 1 et 3 de l'encoche 1 aboutissent aux faisceaux inférieurs 14 et 16 placés dans l'encoche 4.



Avec un pas raccourci $Y_1 = 11$, on aurait :



Les faisceaux supérieurs 1 et 3 partant de l'encoche 1 aboutissent dans deux encoches différentes, ce qui est pratiquement impossible à réaliser avec des sections à fil.

Ce bobinage serait réalisable avec des barres de longueurs différentes, mais cela compliquerait le travail.

1,3. Calcul des pas d'un enroulement ondulé-tension avec section morte.

L'induit comporte (*fig. VI-3*) : 16 encoches, 32 sections, 4 faisceaux par encoche (62 faisceaux actifs et 2 faisceaux en section morte), 31 lames au collecteur, 4 pôles.

$$Y = \frac{F \pm 2a}{p} = \frac{62 \pm 2}{2} \quad \left| \begin{array}{l} \dfrac{62+2}{2} = 32 \\ \dfrac{62-2}{2} = 30 \end{array} \right. \quad \left| \begin{array}{l} Y_1 = 17 \\ Y_2 = 15 \\ Y_1 = 15 \\ Y_2 = 15 \end{array} \right.$$

L'enroulement comportant 4 faisceaux par encoche, on choisira le pas allongé pour les raisons invoquées dans l'exemple précédent, d'où $Y_1 = 17$ et $Y_1 = 15$.

Pas au collecteur $Y_c = \frac{Y}{2} = \frac{32}{2} = 16$, soit 0 à 16.

Pas de Y_1 dans les encoches : $\frac{N}{p} = \frac{16}{4} = 4$, soit 0 à 4 ou 1 à 5.

1,4. Schéma de l'enroulement partiel d'un induit avec fausses barres

L'induit comporte (*fig. VI-8*) : 203 lames au collecteur, 4 pôles, 68 encoches, 6 faisceaux par encoche, soit 408 faisceaux. Enroulement ondulé série simple.

Calcul des pas :

$$Y = \frac{408 + 2}{2} = 205 \text{ avec un pas allongé.}$$

$$Y = \frac{408 - 2}{2} = 203 \text{ avec un pas raccourci.}$$

Dans les deux cas Y est impair, ce qui rend le bobinage impossible à exécuter.

Pour qu'il soit réalisable, on supprime une section (soit deux faisceaux), qui ne sera pas reliée au collecteur, d'où :

$$Y = Y_1 + Y_2$$

$$\frac{F \pm 2a}{p} = \frac{406 \pm 2}{2} \quad \left| \begin{array}{l} \dfrac{406+2}{2} = 204 \\ \dfrac{406-2}{2} = 202 \end{array} \right. \quad \left| \begin{array}{l} Y_1 = 103 \\ Y_2 = 101 \\ Y_1 = 101 \\ Y_2 = 101 \end{array} \right.$$

Pas au collecteur en prenant Y_1 et $Y_2 = 101$:

$$Y_c = \frac{Y_1 + Y_2}{2} = \frac{101 + 101}{2} = 101.$$

VI,2. ENROULEMENT DES INDUITS AVEC SPIRE DE FERMETURE

En dehors du dispositif d'enroulement avec une section morte ou fausses barres, il existe une autre solution qui permet de rendre possible un bobinage paraissant irréalisable du fait que Y est un nombre impair en fonction du nombre de faisceaux et du nombre de pôles de la machine projetée.

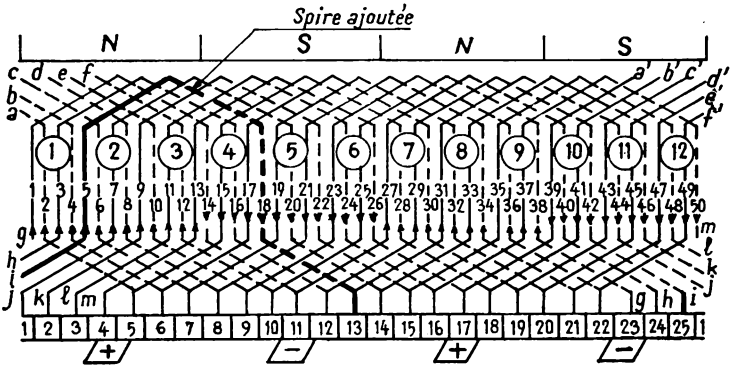


FIG. VI-4. — Enroulement ondulé série d'un induit avec « spire de fermeture », comportant : 12 encoches, 24 sections + une spire de fermeture, soit 50 faisceaux actifs, 4 faisceaux par encoche sauf les encoches 2 et 5 qui reçoivent la spire ajoutée, 25 lames au collecteur, 4 pôles.

$Y = 26$; $Y_1 = 13$; $Y_2 = 13$ et $Y_c = 13$.

Pour ce faire, on ajoute une spire au bobinage, comme le font ressortir les schémas des *figures VI-4* et *VI-5*. Cette spire se loge dans deux encoches en supplément des faisceaux déjà en place Sa section est égale à celle d'un des conducteurs des faisceaux.

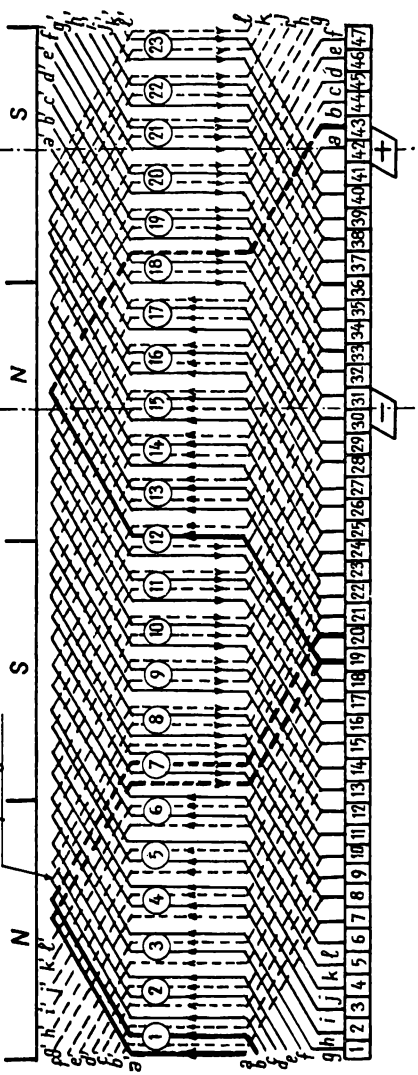


FIG. VI-5. — Enroulement ondulé série d'un induit de dynamo tétrapolaire qui comporte : 23 encoches, 46 sections + une spire de fermeture, soit 4 faisceaux par encoche, sauf les encoches 1 et 7 qui en comportent 5, 47 lames au collecteur.

Pas allongé : $Y = \dfrac{94+2}{2} = 48$. $Y_1 = 25$. $Y_2 = 23$.

$$Y_c = \frac{K+1}{p} = \frac{47+1}{2} = 24, \text{ soit 1 à 25 ou 0 à 24.}$$

1,1. Calcul des pas d'un enroulement ondulé série-simple avec une spire ajoutée.

Cette spire, appelée également spire de fermeture, permet de réaliser l'enroulement de la *figure VI-4*.

L'induit comporte : 12 encoches, 24 sections, 48 faisceaux + une spire de fermeture, soit 50 faisceaux, 25 lames au collecteur, 4 pôles.

Recherche de la valeur Y sans spire de fermeture :

$$Y = \frac{F \pm 2a}{p} = \frac{48 \pm 2}{2} \quad \left| \begin{array}{l} \dfrac{48+2}{2} = 25 \\ \dfrac{48-2}{2} = 23 \end{array} \right.$$

Dans les deux cas Y est impair; le bobinage n'est pas réalisable, mais il devient possible avec une spire de fermeture, soit avec 50 faisceaux actifs au lieu de 48, d'où :

$$Y = \frac{50 \pm 2}{2} \quad \left| \begin{array}{l|l|l} \dfrac{50+2}{2} = 26 & \begin{array}{l} Y_1 = 13 \\ Y_2 = 13 \end{array} & \text{réalisable et adopté} \\ \dfrac{50-2}{2} = 24 & \begin{array}{l} Y_1 = 13 \\ Y_2 = 11 \end{array} & \text{réalisable} \end{array} \right.$$

Pas diamétral des encoches : $\dfrac{12}{4} = 3$ soit 1 à 4 pour Y_1 et Y_2.

Encoche 1 ..... à encoche 4

Faisceaux 1.2.3.4 13.14.15.16

$Y_1 = 13$

$Y_1 = 13$

$$Y_c = \frac{Y}{2} = \frac{26}{2} = 13, \text{ soit 0 à 13 ou 1 à 14.}$$

2,1. Exemple d'un enroulement ondulé série-simple avec 1 spire de fermeture

L'induit comporte 23 encoches (*fig. VI-5*), 4 faisceaux par encoche, 46 sections + une spire de fermeture, 47 lames au collecteur, 4 pôles.

Recherche de la valeur de Y sans spire de fermeture :

$$F = 46 \times 2 = 92 \text{ faisceaux.}$$

$$Y = \frac{F \pm 2a}{p} = \frac{92 \pm 2}{2} = \begin{cases} \dfrac{92+2}{2} = 47 \\ \dfrac{92-2}{2} = 45 \end{cases}$$

Ces deux résultats de Y donnent des nombres impairs; le bobinage n'est pas réalisable, car l'enroulement ne se fermerait pas en passant par tous les faisceaux.

Il devient possible avec une spire de fermeture, soit avec 2 faisceaux supplémentaires de 1 spire seulement, logée dans les encoches 1 et 7 (voir schéma).

Recherche des pas avec 94 faisceaux :

$$Y = \frac{94 \pm 2}{2} \left| \begin{array}{l|l} \dfrac{94+2}{2} = 48 & Y_1 = 25 \\ & Y_2 = 23 \\ \dfrac{94-2}{2} = 46 & Y_1 = 23 \\ & Y_2 = 23 \end{array} \right.$$

Y étant pair dans les deux cas et Y_1 et Y_2 impairs, le bobinage est réalisable. On choisira $Y_1 = 25$ de façon à utiliser des sections de même gabarit pour tout le bobinage.

Pas diamétral des encoches : $\dfrac{23}{4} = 5{,}75$ soit 6 (1 à 7).

Les connexions de Y_1 et Y_2 embrasseront

$$1 + 6 = 7 \text{ encoches.}$$

$$Y_c = \frac{Y}{2} = \frac{48}{2} = 24 \text{ soit 1 à 25.}$$

VI,3. PROCÉDÉS DE REPRÉSENTATION PARTIELLE DES ENROULEMENTS

3,1. Exemple d'un bobinage comportant un grand nombre de conducteurs périphériques

Lorsque l'induit comporte un grand nombre de faisceaux (plusieurs centaines), il n'est pas nécessaire de dessiner le schéma avec tous les faisceaux pour en vérifier

l'exactitude et pour permettre au bobineur d'en faire l'enroulement.

Dans la *figure VI-6*, on a : 89 encoches, 4 faisceaux par encoche = 356 faisceaux, 178 lames au collecteur, enroulement ondulé simple à 6 pôles.

$$Y = \frac{F \pm 2}{p} = \frac{356 \pm 2}{3} = \left| \begin{array}{l} \dfrac{356+2}{3} = 119{,}33 \text{ (impossible).} \\ \dfrac{356-2}{3} = 118 \end{array} \right| \begin{array}{l} Y_1 = 59 \\ Y_2 = 59 \end{array}$$

$$Y_c = \frac{Y}{2} = \frac{118}{2} = 59.$$ ***L'enroulement paraît réalisable, mais en réalité il n'est pas possible avec des bobines,*** car deux faisceaux supérieurs partant d'une même encoche aboutissent à deux encoches différentes. Par contre, il est réalisable avec des barres formées sur deux gabarits différents, ce qui complique le travail.

Encoche 1 .... aux encoches 15 ..... et 16

1.2.3.4 57.58.59.60 61.62.63.64

$Y_1 = 59$

$Y_1 = 59$

Comme on le voit en partant de l'encoche 1 avec Y_1 et Y_2 égaux, on aboutit à 2 encoches (15 et 16), ce qui oblige à utiliser des barres de longueurs différentes.

On peut remédier à cet inconvénient en allongeant le pas Y_1 et en raccourcissant d'autant Y_2, soit : $Y_1 = 59 + 2 = 61$ et $Y_2 = 59 - 2 = 57$. Ou obtient ainsi un bobinage à barres ou à sections égales rationnelles en conservant $Y_c = 59$ (*fig. VI-6*).

Encoche 1 ..... à encoche 16

1.2.3.4 61.62.63.64

$Y_1 = 61$

$Y_1 = 61$

3,2. Réalisation du schéma VI-6

Connaissant le pas partiel $Y_1 = 61$, on trace un faisceau supérieur et on compte $1 + 61 = 62$, ce qui amène à dessiner un faisceau inférieur assez éloigné du faisceau 1.

Pour $Y_2 = 57$, on compte $62 + 57 = 119$ faisceaux (le 119 est supérieur). C'est le troisième faisceau du premier cycle périphérique.

Puis, pour Y_1 suivant, on a : $119 + 61 = 180$ faisceaux (inférieur).

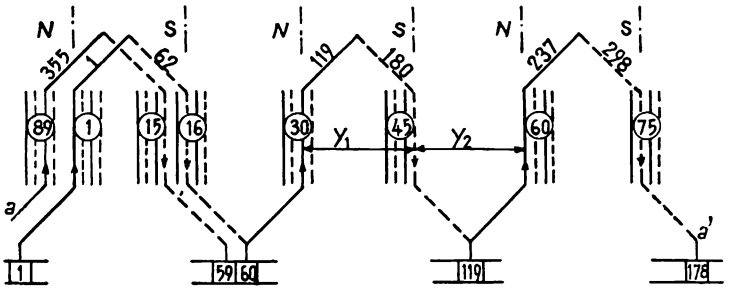


FIG. VI-6. — Schéma simplifié d'un enroulement ondulé série simple à grand nombre de faisceaux, soit : 89 encoches, 4 barres ou faisceaux par encoche, 356 faisceaux, 178 lames au collecteur, 6 pôles.

Pas raccourci : $Y = \dfrac{356 - 2}{3} = 118$, d'où $Y_1 = 61$, $Y_2 = 57$, $Y_c = 59$, pas d'encoche des sections 1 à 16.

En partant de la lame 60 du collecteur et du faisceau 119, on revient à la lame 59 après avoir fait un tour de l'induit. Cela prouve que le pas est raccourci et que le bobinage est réalisable en ondulé série.

Pour Y_2 suivant, on aboutit au faisceau $180 + 57 = 237$ (supérieur), etc., ce qui donne les positions suivantes pour le premier cycle périphérique des faisceaux :

$$1 + 61 = 62, + 57 = 119, + 61 = 180, + 57 = 237,$$
$$+ 61 = 298, + 57 = 355, + 61 = 60.$$

Ce dernier nombre amorce le deuxième cycle périphérique ; le faisceau 356 étant le dernier, on compte 1,

puis 60 jusqu'à l'encoche 15, voisine de l'encoche 16. Le pas étant raccourci, on aboutit à la lame 59. Il s'agit donc bien d'un enroulement ondulé série-simple à pas raccourci.

On remarque que la position des faisceaux dans les encoches n'est pas toujours la même.

3,3. Pas des encoches.

Sachant que l'on a 4 faisceaux par encoche et en reprenant les pas Y_1 et Y_2 avec, comme point de départ, la rainure 1, on trouve les pas d'encoches suivants pour un premier cycle périphérique :

Départ.....	encoche 1
62 : 4 = 15 + 2 faisceaux	= encoche 16
119 : 4 = 29 + 3	= encoche 30
180 : 4 = 45, soit l'encoche .	 45
237 : 4 = 59 + 1 faisceau	= encoche 60
298 : 4 = 74 + 2 faisceaux	= encoche 75
355 : 4 = 88 + 3 faisceaux	= encoche 89.

Cette encoche termine le premier cycle, elle est voisine de l'encoche 1 où il a débuté.

A partir de cet instant, le bobinage partiel est réalisé. Il ne reste plus qu'à tracer tous les faisceaux des encoches de ce premier cycle. Il apparaîtra alors que les faisceaux constituant ce cycle n'ont pas toujours la même position dans les encoches, mais ce détail est normal, il ne constitue pas un obstacle à la réalisation pratique du bobinage.

Pour terminer le schéma, on tracera le collecteur que l'on réunira au bobinage en respectant le pas $Y_c = 59$.

On pourra ensuite déterminer l'emplacement des pôles.

3,4. Schéma de bobinage simplifié de la figure VI-7

Il s'agit d'un induit de dynamo hexapolaire comportant un grand nombre d'encoches à 4 faisceaux par encoche, bobiné en ondulé série-simple.

Induit : 85 encoches, 170 lames au collecteur, 170 sections, 340 faisceaux, 2 voies d'enroulement.

Calcul des pas : $Y = Y_1 + Y_2$, soit :

$$Y = \frac{F \pm 2a}{p} = \frac{340 \pm 2}{3} \quad \left| \begin{array}{l} Y = \dfrac{340+2}{3} = 114 \\ Y = \dfrac{340-2}{3} = 112{,}6 \quad \text{impossible.} \end{array} \right. \quad \left| \begin{array}{l} Y_1 = 57 \\ Y_2 = 57 \end{array} \right.$$

$Y_c = \dfrac{K \pm 1}{p}$ le pas composant Y étant allongé on prendra le signe $+$, soit $Y_c = \dfrac{170+1}{3} = 57$, soit 0 à 57.

Pas d'encoche et position des faisceaux F dans les encoches N du schéma.

En partant du faisceau 1 de l'encoche 1, on a :

$Y_1 = 1 + 57 = 58$, soit 58 | 4 F
18 | $14N + 2F$ = encoche 15
2 |

$Y_2 = 58 + 57 = 115$, soit 115 | 4
35 | $28 + 3F$ = encoche 29
3 |

$Y_1 = 115 + 57 = 172$, soit 172 | 4
12 | 43 soit encoche 43
0 |

$Y_2 = 172 + 57 = 229$, soit 229 | 4
29 | $57 + 1F$ = encoche 58
1 |

$Y_1 = 229 + 57 = 286$, soit 286 | 4
6 | $71 + 2F$ = encoche 72
2 |

$Y_2 = 286 + 57 = 346$, soit 343 | 4
23 | $85 + 3F$ = encoche 1
3 |

On a ainsi parcouru un tour d'induit. **Le deuxième tour partirait du faisceau 3, mais il n'y a plus de calcul à faire, il suffit de tracer des traits parallèles à ceux du premier tour.**

Pour la réalisation pratique du bobinage, il en est de même. Il suffit de placer la première section au pas d'encoche 1 à 15, puis toutes les autres en parallèle.

En consultant le schéma, on constate que de l'encoche 43 à l'encoche 58 le pas est 1 à 16. En réalité cela n'a aucune

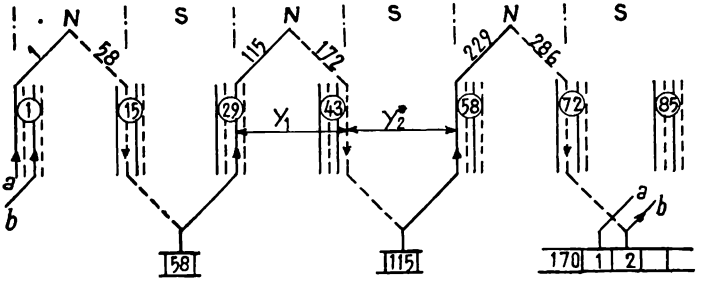


FIG. VI-7. — Schéma simplifié d'un enroulement ondulé série simple à grand nombre de faisceaux, soit : 6 pôles, 85 encoches, 170 lames au collecteur, 170 sections, 4 faisceaux par encoche, 340 faisceaux, pas allongé.

$Y = 114$. $Y_1 = 57$. $Y_2 = 57$. $Y_c = 57$. Pas d'encoche 1 à 15.

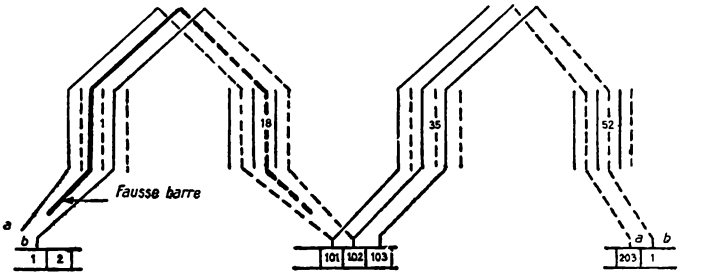


FIG. VI-8. — L'enroulement n'est représenté que partiellement en raison du grand nombre de faisceaux, mais sa lecture permet de réaliser un bobinage qui comprend : 406 faisceaux et 2 fausses barres, 68 encoches, 203 lames au collecteur, 6 faisceaux par encoche, bobinage ondulé simple 4 pôles.

$$Y = \frac{406 - 2}{2} = 202; (Y_1 = 101); (Y_2 = 101); (Y_c = \frac{202}{2} = 101)$$

Les fausses barres logées dans les encoches 1 et 18 garnissent celles-ci, mais ne jouent aucun rôle électrique.

importance, car il s'agit de Y_2 (raccordement entre faisceaux) et non du pas de la section Y_1.

Pour la mise au collecteur Y_2, il en est de même que pour le pas d'encoche; il suffit de raccorder convenablement un faisceau inférieur à un faisceau supérieur. On reliera par exemple le faisceau 58 au faisceau 115, dans l'axe des encoches 15 et 29 pour les souder à la lame du collecteur correspondante, soit ici la lame 58.

Les autres connexions se feront en suivant, sans aucune difficulté, tous les faisceaux étant en parallèle.

VI,4. DÉCALAGE DE LA MISE AU COLLECTEUR

A. — Certains moteurs ou générateurs, destinés à des affectations spéciales bien définies ont des porte-balais fixes calés sur l'axe des pôles.

Si l'on veut obtenir une bonne commutation de ces machines, il est nécessaire de décaler dans un sens approprié, d'une ou plusieurs lames, la mise au collecteur du bobinage.

En cas de réparation d'un tel induit, il est prudent de tenir compte de ce détail et de repérer, au démontage, le nombre de lames que comporte le décalage.

B. — **Pour des raisons d'accessibilité aux charbons et de simplification,** on dispose les balais de certaines machines à 90° de l'axe des pôles, entre les têtes des bobines inductrices (sur la ligne neutre).

Ce dispositif entraîne une mise au collecteur décalée de 90° également, comme l'indique la *figure VI-9* (cas d'un moteur bipolaire).

Avec un moteur tétrapolaire, le décalage serait de 45° géométriques.

Remarque. — En bobinage, 360° électriques correspondent à l'espace soumis à l'influence d'une paire de pôles. Un enroulement d'induit à quatre pôles comporte 360° × 2 paires de pôles = 720° électriques et 360° géométriques (Voir *fig.* X-6).

Avec un induit bipolaire, les degrés électriques et mécaniques se confondent, ils ont la même valeur.

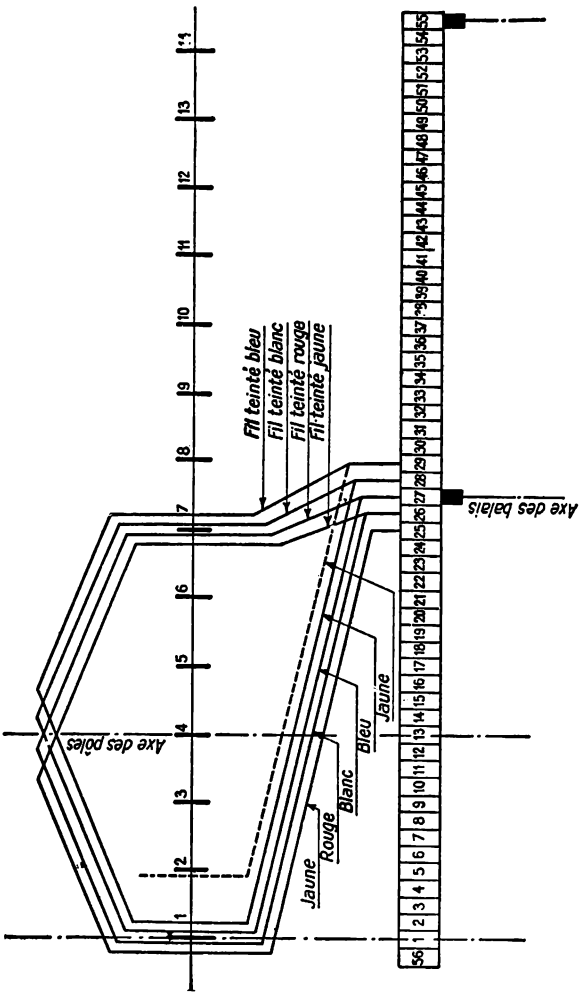


FIG. VI-9. — Schéma de branchement du bobinage d'un induit de 750 W, 220 V, 14 encoches, 8 faisceaux par encoche, 56 lames au collecteur, décalage de la mise au collecteur pour balais placés à 90° de l'axe des pôles. Enroulement bipolaire imbriqué; pas de la section sur l'induit : 1 à 7 encoches.

Caractéristiques du bobinage :

Induit : 12 spires par section (96 fils par encoche) ; fil de 0,65 **mm** émaillé et coton; résistance entre balais : 2,9 Ω; poids total du fil : 0,740 kg.

Inducteur : 3 000 spires par bobine inductrice ; fil de 0,22 **mm** émaillé ; résistance d'une bobine à 20°C : 490 Ω; poids du fil des deux pôles : 0,800 kg.

VI,5. ENROULEMENT DES INDUITS DES PETITS MOTEURS

Le bobinage industriel des petits induits se fait soit à la machine à bobiner, soit au moyen de bobines gabariées, soit à fils passés.

Quand il s'agit d'un rebobinage, celui-ci s'effectue souvent en utilisant l'enroulement à boucles (*fig. VI*-10).

Ces induits trouvent leur emploi dans l'équipement des appareils électro-domestiques tels que cireuses, aspirateurs et les machines portatives du type perceuses.

L'enroulement des induits bipolaires se fait généralement avec un pas raccourci, dit « à corde », qui évite de cintrer les têtes des bobines autour de l'arbre. Ce procédé diminue sensiblement le volume des têtes de bobines. En adoptant le pas à corde, on réduit celui de la section de 20 % du pas normal.

Exemple. — Un induit bipolaire de 24 encoches a un pas d'encoche de $\frac{24}{2} = 12$, soit 0 à 12, ou 1 à 13.

Avec un pas à corde, on a un pas de :

$$0{,}80 \times 12 = 9{,}6, \text{ soit } 0 \text{ à } 10 \text{ ou } 1 \text{ à } 11.$$

5,1. Procédés d'enroulement des petits induits

— Enroulement à boucles à deux faisceaux par encoche.
— Enroulement à boucles à plusieurs sections par encoche.
— Enroulement avec plusieurs fils en main.
— Enroulement à boucles à pas divisé.
— Enroulement à boucles avec bobines en V.
— Enroulement avec bobines parallèles.

5,2. Enroulement à boucles à deux faisceaux par encoche

Ce bobinage a l'inconvénient de former des bobines de dimensions inégales, qui déséquilibrent l'induit, tant au point de vue mécanique qu'au point de vue électrique (la résistance ohmique variant de l'une à l'autre).

Malgré ces dyssymétries, cet enroulement est fréquemment réalisé en adoptant la progression à « main droite » ou à « main gauche ».

Avant d'exécuter le bobinage, on procède à l'habillage de l'induit, en isolant les faces latérales du tambour avec deux disques en presspahn de 0,6 à 1 mm d'épaisseur.

On isole également l'arbre sur toute la partie qui peut entrer en contact avec les têtes de bobines.

Les rainures du tambour étant garnies de capotes isolantes, on débute le bobinage comme l'indique la *figure VI-10.*

L'enroulement à boucles s'effectue avec le procédé du fil passé en utilisant une bobine de fil de cuivre. Le bobinage se réalise entièrement sans couper le fil, en bouclant simplement les extrémités des sections sur une longueur suffisante pour permettre la connexion au collecteur.

Au cours du bobinage, il est recommandé d'isoler les parties frontales en glissant une toile isolante entre chaque tête de bobine, afin d'éviter un court-circuit possible entre sections.

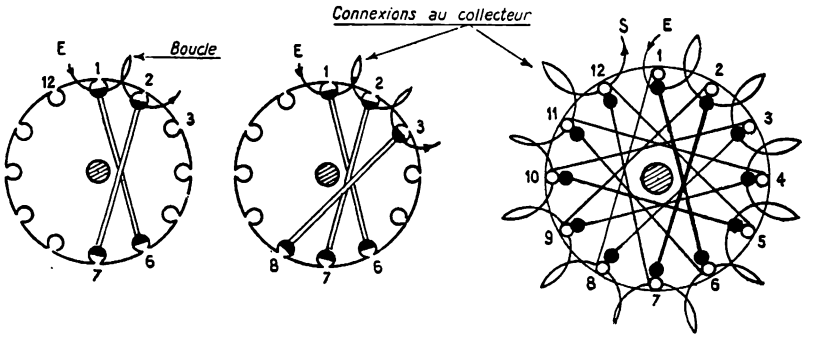


FIG. VI-10. — Bobinage bipolaire à boucle à 2 faisceaux par encoche d'un petit induit comportant 12 rainures.

Avec un pas normal, on aurait un pas d'encoche de :

$$\frac{12}{2p} = \frac{12}{2} = 6.$$

Pour éviter le contournement partiel de l'arbre par le bobinage, on choisit un pas raccourci, dit « pas à corde », qui représente sensiblement 80 % du pas normal, soit :

$$0{,}80 \times 6 = 4{,}8;$$

d'où un pas de 0 à 5, soit 1 à 6.

Après avoir placé la moitié des conducteurs dans l'encoche, on reprend l'encoche suivante, etc...

Dans la plupart des bobinages des petits induits, on doit prévoir un amarrage de la dernière ou des deux dernières bobines au moyen d'une ficelle.

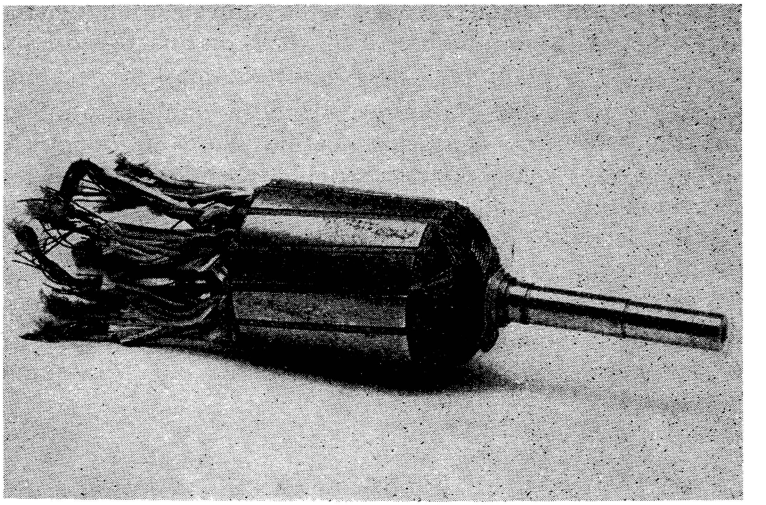


FIG. VI-11. — Petit induit bipolaire avant la mise au collecteur de son bobinage.

L'amarrage se fait en plaçant la ficelle sous les têtes de bobines précédentes, puis, quand la dernière est en place, on attache fortement les bobines ensemble.

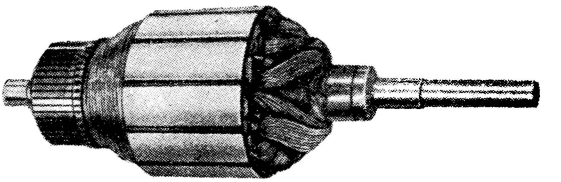


FIG. VI-12. — Petit induit 12 encoches à 2 faisceaux par encoche, bobiné d'après le schéma de la figure VI-14. On remarque que les fils reliés au collecteur sont maintenus par un frettage en ficelle, afin d'éviter les effets de la force centrifuge quand le moteur tourne

5,3. Enroulement à boucles à plusieurs sections par encoche

Ce bobinage s'exécute comme s'il s'agissait d'un enroulement normal à boucles, en divisant les spires contenues dans l'encoche, de façon à réaliser deux, trois ou quatre sections.

Après avoir placé les spires d'une première section, on exécute une boucle, puis on continue à remplir la même encoche avec une deuxième section dont on boucle la sortie. Cette sortie constituera l'entrée d'une troisième section, s'il y a trois sections par encoche, sinon la boucle servira de liaison avec les conducteurs de la rainure suivante, etc...

Dans ces induits, le nombre de lames au collecteur est un multiple de celui des encoches, le nombre de lames étant égal à celui des sections placées sur le tambour d'induit.

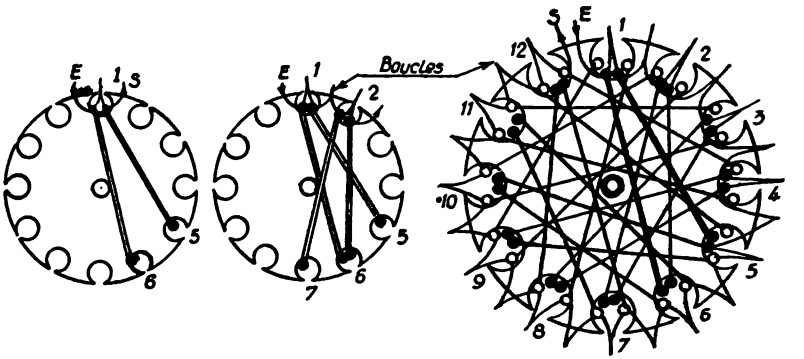


Fig. VI-13. — Bobinage bipolaire à boucles, à pas divisé, d'un petit induit comportant 12 encoches.

Pas d'encoche normal : $\frac{12}{2p} = \frac{12}{2} = 6.$

Pas à corde : 0,80 × 6 = 5, soit 1 à 5 pour la petite demi-section et 1 à 6 pour la plus grande.

On débute par l'encoche 1 qui reçoit en premier lieu la moitié des conducteurs qui lui sont destinés, tandis que les encoches 5 et 6 n'en reçoivent qu'un quart seulement. On boucle la sortie *S* et on continue par l'encoche 2.

5,4. Enroulement avec plusieurs fils en main

Pour exécuter ce bobinage, on installe, sur une barre de fer rond, deux, trois ou quatre bobines de fil, dont on réunit les extrémités pour former deux, trois ou quatre sections qui seront placées ensemble dans la même encoche.

Ce procédé nécessite toutefois la suppression des boucles, afin de permettre le repérage des entrées et des sorties des sections. Pour cela, on coupe les fils à la sortie des encoches, afin de distinguer les extrémités de chaque section, qui recevront une gaine de coton teintée d'une couleur pour les entrées et d'une autre couleur pour les sorties.

Lors de la mise au collecteur, on devra avoir recours à une lampe témoin pour vérifier la mise en série des sections de chaque encoche.

5,5. Enroulement à boucles avec bobines en V

Cet enroulement s'emploie avantageusement lorsque la distance entre l'arbre et le fond des encoches est réduite. Les bobines se plaquent aisément sur les faces latérales du tambour d'induit.

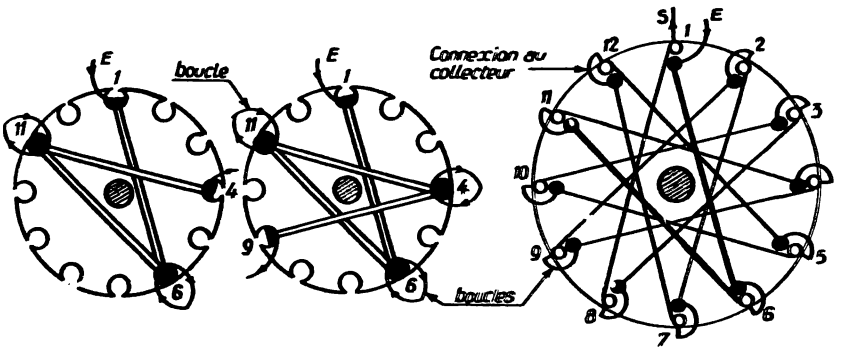


FIG. VI-14. — Bobinage bipolaire à boucles avec bobines en V d'un petit induit comportant 12 encoches. Pas normal : 6. Pas à corde : 0,80 × 6 = 5, soit 1 à 6. En débutant par les encoches 1 et 6, on place la moitié des conducteurs destinés à l'entaille 1 et on continue le remplissage de l'encoche 6 en repartant à l'entaille 11, etc... ce qui donne un enroulement progressif constant.

On réalise le bobinage soit en coupant le fil après avoir placé chaque section, et en enfilant une gaine teintée différemment pour les entrées et les sorties, soit en bouclant le bobinage.

Dans le dernier cas, on glisse, sur le fil qui servira au bobinage, autant de petites gaines de coton teintées alternativement, en rouge et en jaune par exemple, qu'il y a de sections.

A chaque fin de section, on laisse, dans la boucle, deux gaines qui permettront de distinguer les entrées des sorties (rouge pour l'entrée, jaune pour la sortie, par exemple).

Ce type d'enroulement peut être exécuté quel que soit le nombre d'encoches. Il est particulièrement employé pour le bobinage des induits de dynamos d'automobiles, où la tension relativement faible de ces génératrices (6 ou 12 volts) dispense de placer des isolants entre bobines frontales, ce qui réduit encore le volume des têtes de bobines.

5,6. Enroulement à bobines parallèles

Les bobines, disposées parallèlement deux à deux sur les faces de l'induit, donnent un bon équilibrage mécanique.

La résistance ohmique entre bobines est également mieux partagée que dans les précédents modes d'enroulement, où chaque bobine a une longueur différente de celle de sa voisine. En effet, avec l'enroulement à bobines parallèles deux à deux, on a deux groupes identiques, qui possèdent la même longueur de fil.

Le bobinage de ces induits se fait avec ou sans boucles. Dans ce dernier cas, on coupe le fil après la mise en place de chaque section, et on glisse deux gaines teintées différemment aux extrémités libres, pour marquer l'entrée et la sortie.

Les gaines utilisées ont en principe une longueur égale à la distance qui sépare le collecteur du tambour d'induit.

Si le bobinage se fait avec boucles, on glisse sur le fil toutes les gaines, en alternant les deux couleurs et on abandonne une gaine de chaque teinte à chaque boucle.

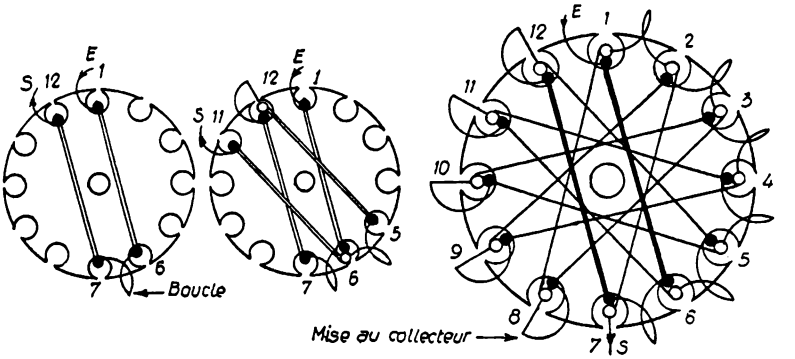


FIG. VI-15. — Enroulement bipolaire à bobines parallèles d'un petit induit bipolaire à 12 encoches.

Le bobinage se fait au pas à corde de 1 à 6, en partant de l'encoche 1 et en se bouclant à l'entaille 7, après avoir placé la moitié des conducteurs destinés aux encoches 1 et 6. On continue par les encoches 7 et 12 ; cette dernière se boucle dans l'encoche même avec le faisceau 12-5. La progression se fait de droite à gauche. *E* et *S*, qui se trouvent placées à 180°, se relient pour aller à une lame du collecteur.

CHAPITRE VII

CONNEXIONS ÉQUIPOTENTIELLES DES MACHINES A COURANT CONTINU

VII,1. NÉCESSITÉ DES CONNEXIONS ÉQUIPOTENTIELLES

Généralités.

Les machines multipolaires nécessitent des connexions équipotentielles, car il est difficile de les construire avec des circuits magnétiques parfaitement symétriques.

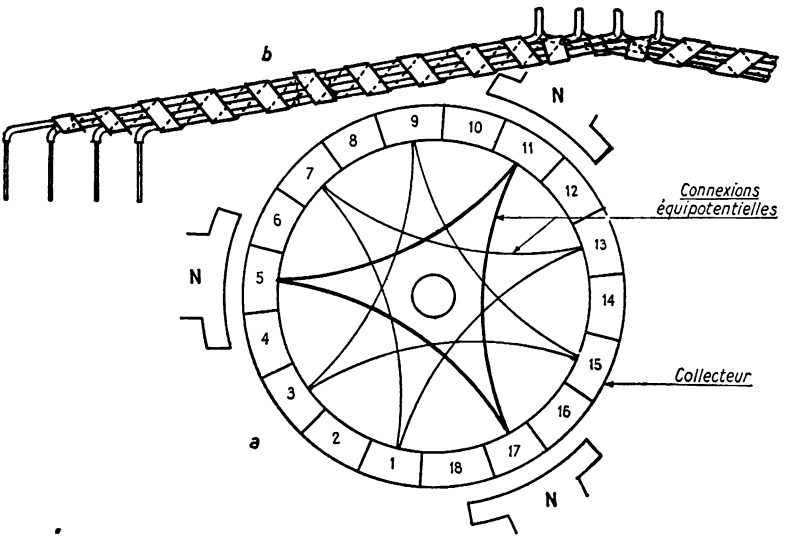


FIG. VII-1. — *a*) Répartition des connexions équipotentielles sur un collecteur de 18 lames à raison d'une connexion toutes les deux lames. On peut constater que la connexion en trait fort relie trois lames placées sur l'axe des trois pôles Nord; *b*) Vue partielle d'un paquet de 4 connexions équipotentielles. Le côté droit, qui n'est pas figuré sur le dessin, est symétrique à la partie gauche.

Les connexions équipotentielles servent à réunir des points de l'enroulement qui doivent être théoriquement au même potentiel et qui ne le sont pas par suite d'asymétries. Les machines à enroulement imbriqué et ondulé

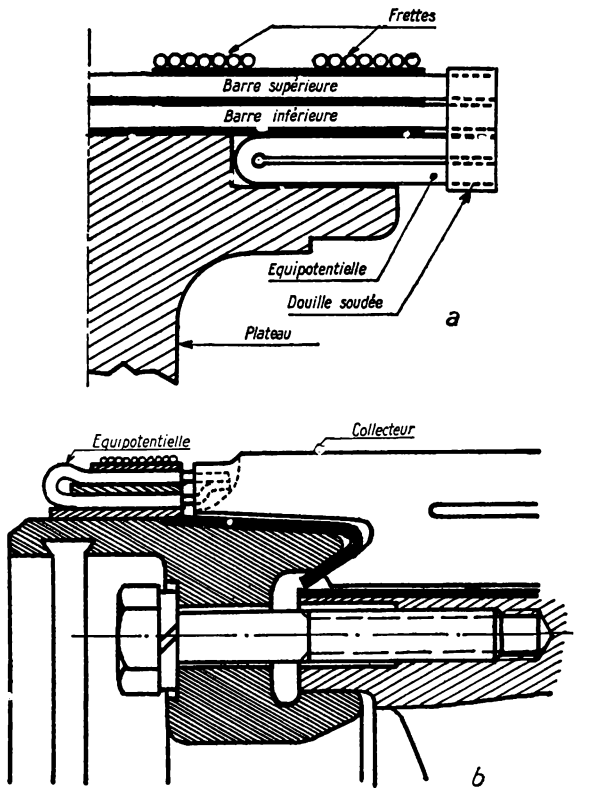


FIG. VII-2. — Disposition des connexions équipotentielles sur un induit de machine à courant continu à pôles multiples : *a*) Côté chignon; *b*) Côté collecteur.

série-parallèle sont fréquemment dans ce cas lorsque le flux magnétique émis par les divers pôles n'a pas exactement la même valeur.

Les forces électromotrices induites dans les voies d'enroulement sont alors différentes, ce qui provoque des courants

de circulation dans le bobinage. Ces courants ont pour effet de produire un échauffement supplémentaire de la machine et des étincelles aux balais.

Provenance des dissymétries.

Les principales raisons de dissymétries dans les différents circuits magnétiques proviennent :

1° des **soufflures** et autres inégalités dans le métal constituant le circuit magnétique;

2° des **différences d'entrefer** entre les divers pôles et l'induit, par suite de l'usure des coussinets, ou au montage des pôles;

3° des **inégalités d'ampères-tours** dans les bobines inductrices par suite de court-circuit entre spires, ou d'erreur dans le nombre des spires.

Pour annuler l'effet de ces asymétries et équilibrer les F.E.M. dans les voies d'enroulement, on ajoute au bobinage des conducteurs réunissant les lames du collecteur qui se trouvent au même potentiel, d'où l'appellation de « connexions équipotentielles ».

Ces connexions fournissent aux courants de circulation des chemins courts et peu résistants, et équilibrent les F.E.M. dans les diverses parties de l'enroulement.

1,1. Conditions nécessaires pour placer des connexions équipotentielles

a) Enroulements en parallèle (Imbriqués).

Pour qu'il y ait possibilité de disposer des connexions équipotentielles dans le cas d'un enroulement imbriqué, il suffit que le nombre d'encoches par paire de pôles soit entier, quel que soit, par ailleurs, le nombre de lames au collecteur.

b) Enroulements en série (Ondulés simples).

Pas d'équipotentielles, on a que deux voies d'enroulements.

c) Enroulements en série parallèle.

$\frac{K}{a}$ et $\frac{p}{a}$ doivent être des nombres entiers si l'on veut placer des connexions équipotentielles.

1,2. Disposition des connexions équipotentielles

Il n'est pas nécessaire de placer des connexions équipotentielles sur toutes les lames du collecteur : ***on les dispose sur une fraction de lames seulement,*** soit une connexion toutes les deux, trois, quatre lames et même davantage. Lorsqu'il y a plus de deux faisceaux par encoche, on place généralement une connexion par encoche.

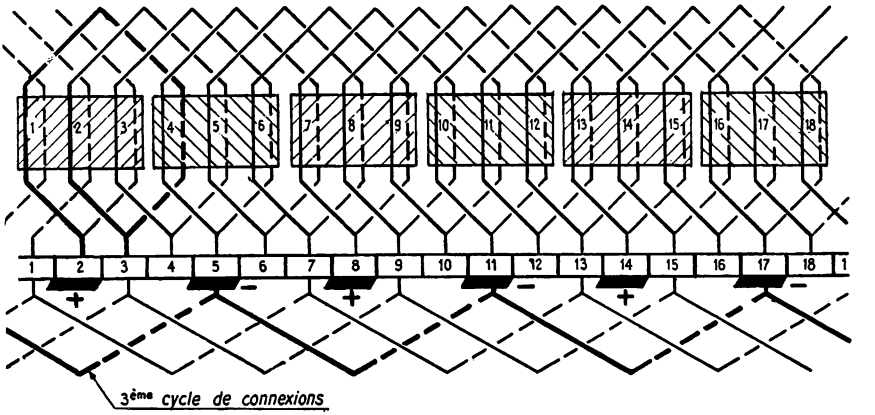


FIG. VII-3. — Schéma de connexions équipotentielles **branchées** côté collecteur, d'une dynamo comportant 6 pôles, 18 encoches, 18 lames au collecteur. Enroulement imbriqué.

$(Y_1 = \frac{36}{6} + 1 = 7)$; $(Y_2 = \frac{36}{6} - 1 = 5)$; $(Y_3 = \frac{18}{3} = 6)$.

En plaçant une connexion équipotentielle toutes les 2 lames, on obtient les 3 cycles suivants :

Premier cycle.....	1 à 7;	7 à 13;	13 à 1;
Deuxième cycle.....	3 à 9;	9 à 15;	15 à 3;
Troisième cycle.....	5 à 11;	11 à 17;	17 à 5.

On remarque tout particulièrement avec le troisième cycle, que les 3 connexions sont exactement au même potentiel; toutes trois sont reliées à une lame placée sous un balai de signe —

Quand l'enroulement de l'induit est constitué par des barres, les connexions se font au moyen de conducteurs méplats en cuivre isolés au coton et reliés entre eux par une tresse. On obtient ainsi une couronne qui se glisse sous les barres, côté chignon (*fig. VII-2 a*).

La section des conducteurs des connexions équipotentielles varie de 1/4 à 1/2 de celle des conducteurs de l'induit.

Les extrémités des connexions sont étamées pour faciliter leur soudure, qui s'effectue au moyen d'une douille en cuivre, dans laquelle sont réunies : une barre supérieure et inférieure, une connexion supérieure et inférieure. Le tout est soudé à l'étain, soit au fer à souder, soit au bain d'étain (*fig. VII-4*).

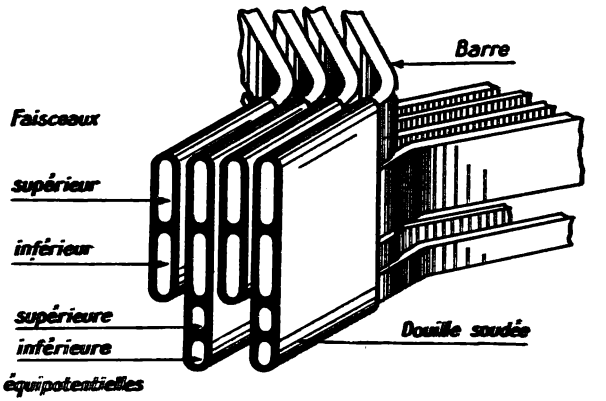


FIG. VII-4. — Disposition des soudures des connexions équipotentielles (côté chignon) d'un induit de machine à courant continu, bobiné avec des barres.

La couronne des équipotentielles est logée sous le bobinage et les extrémités des faisceaux et des équipotentielles sont réunies toutes les deux lames. La section des conducteurs équipotentielles est de l'ordre de 1/4 à 1/2 de celle des conducteurs de l'induit.

Un deuxième procédé consiste à relier directement entre elles les lames du collecteur, en disposant les connexions équipotentielles à l'avant ou à l'arrière du collecteur (bobinages avec sections), ou sur le collecteur.

VII,2. CALCUL DU PAS DES CONNEXIONS ÉQUIPOTENTIELLES

Le pas des connexions est donné par le quotient du nombre de lames (K) du collecteur par le nombre de paires de pôles (p) du bobinage, $Y_e = \frac{K}{p}$. Il est égal à l'écartement de deux balais consécutifs de même polarité.

2,1. Exemple

Un induit hexapolaire à enroulement imbriqué comporte 48 lames au collecteur et 48 sections. Le pas des connexions équipotentielles est le suivant :

$$Y_e = \frac{K}{p} = \frac{48}{3} = 16 \text{ lames, soit 1 à 17 lames.}$$

Si l'on place une connexion toutes les quatre lames, par exemple, on a :

Premier cycle : lame 1 à 17 et 17 à 33, puis 33 + 16 = 49. Comme le collecteur ne comporte que quarante-huit lames, c'est sur la lame 1 que l'on aboutit; le premier cycle est fermé.

Le deuxième cycle débute à la lame 5, c'est-à-dire 1 + 4 = 5, ce qui permet d'écrire :

Premier cycle... lame 1 à 17 — 17 à 33 — 33 à 1.
Deuxième cycle. lame 5 à 21 — 21 à 37 — 37 à 5.
Troisième cycle. lame 9 à 25 — 25 à 41 — 41 à 9.
Quatrième cycle. lame 13 à 29 — 29 à 45 — 45 à 13.
Cinquième cycle. lame 17.

Mais il n'y a pas de cinquième cycle, car la lame 17 est déjà occupée par le premier cycle.

Les connexions équipotentielles de ce bobinage se réduisent donc à quatre cycles.

Premier exemple d'application.

Dans l'exemple de la *figure VII-3*, l'induit hexapolaire comporte 18 lames au collecteur, soit :

Pas des connexions équipotentielles :

$$Y_e = \frac{18}{3} = 6 \text{ lames.}$$

En plaçant une connexion toutes les deux lames, on obtient trois cycles, comme l'indique le texte du schéma.

2,2. Deuxième exemple d'application des connexions équipotentielles (*fig. VII-5*).

Induit de dynamo hexapolaire comportant : un enroulement imbriqué, 24 encoches, 24 lames au collecteur, 48 faisceaux, 1 connexion équipotentielle toutes les 2 lames.

Calcul des pas de l'enroulement :

$$Y_1 = \frac{F}{2p} + 1 = \frac{48}{6} + 1 = 9 \text{ (pas avant).}$$

$$Y_2 = \frac{F}{2p} - 1 = \frac{48}{6} - 1 = 7 \text{ (pas arrière).}$$

Calcul du pas des connexions équipotentielles :

$$Y_e = \frac{K}{p} = \frac{24}{3} = 8 \text{ (soit 0 à 8 ou 1 à 9).}$$

Si l'on place une connexion toutes les deux lames, on obtient 4 cycles répartis comme suit (fig. *VII-5*) :

Premier cycle ..... lame 1 à 9 — 9 à 17 — 17 à 1
Deuxième cycle ..... lame 3 à 11 — 11 à 19 — 19 à 3
Troisième cycle ..... lame 5 à 13 — 13 à 21 — 21 à 5
Quatrième cycle .... lame 7 à 15 — 15 à 23 — 23 à 7

Une deuxième solution aurait pu être utilisée avec 2 cycles seulement, soit 1 connexion toutes les 4 lames :

Premier cycle ..... lame 1 à 9 — 9 à 17 — 17 à 1
Deuxième cycle ..... lame 5 à 13 — 13 à 21 — 21 à 5

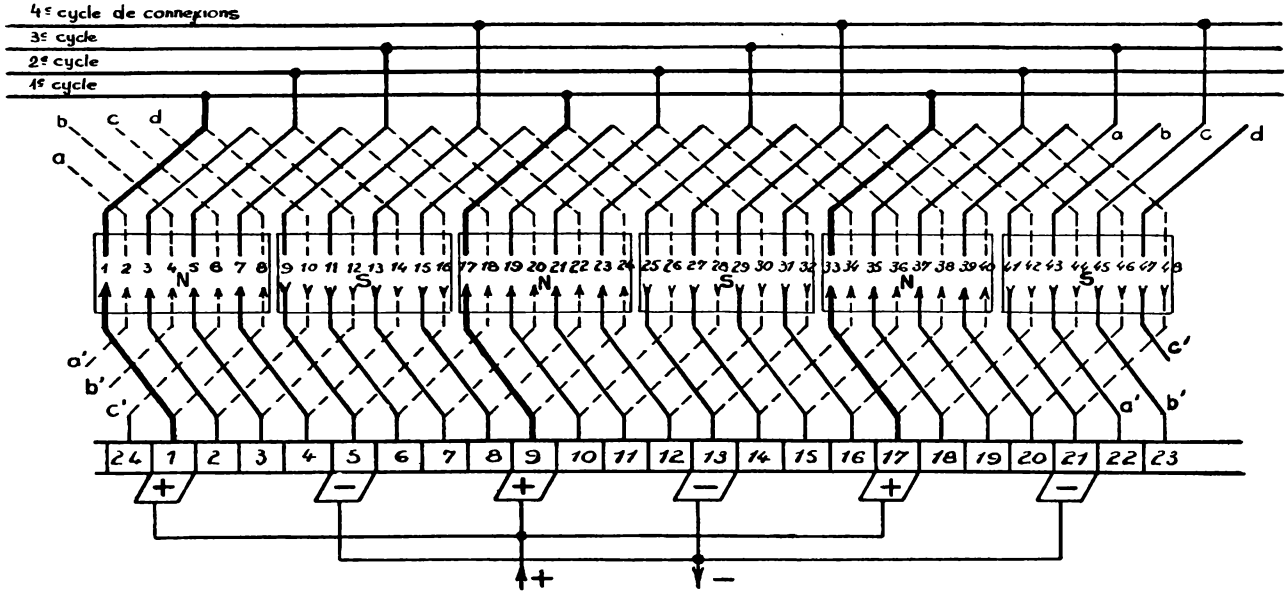


FIG. VII-5. — Liaison des connexions équipotentielles, côté chignon, d'un induit à barres comportant : 24 encoches, 24 lames au collecteur, 48 faisceaux, 6 pôles, enroulement imbriqué, une connexion équipotentielle toutes les deux lames, ce qui donne 4 cycles de 3 connexions chacun.

$$Y_1 = 9 \; ; \quad Y_2 = 7 \; ; \quad Y_3 = \frac{K}{p} = \frac{24}{3} = 8 \text{ (1 à 9).}$$

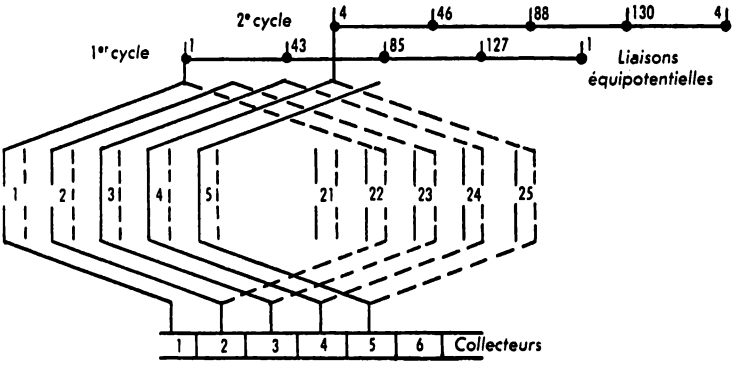


FIG. VII-6. — Représentation schématique simplifiée des connexions équipotentielles d'un moteur à courant continu comportant un enroulement imbriqué 8 pôles avec 168 encoches, 1 paire de barres par encoche, 168 lames au collecteur, 1 connexion toutes les 4 lames en sautant chaque fois 2 lames.

$$Y_1 = 43; \quad Y_2 = 41; \quad Y_6 = \frac{K}{p} = \frac{168}{4} = 42,$$

soit 14 cycles de 4 connexions.

Le premier cycle relie les lames..... 1, 43, 85, 127, 1
Le deuxième cycle relie les lames 4, 46, 88, 130, 4
Le troisième cycle relie les lames 7, 49, 91, 133, 7
Le quatrième cycle relie les lames ..... 10, etc... jusqu'à ce que l'intervalle compris entre les lames 1 et 43 soit complet, soit 56 connexions divisées en 14 cycles de 4 connexions chacun.

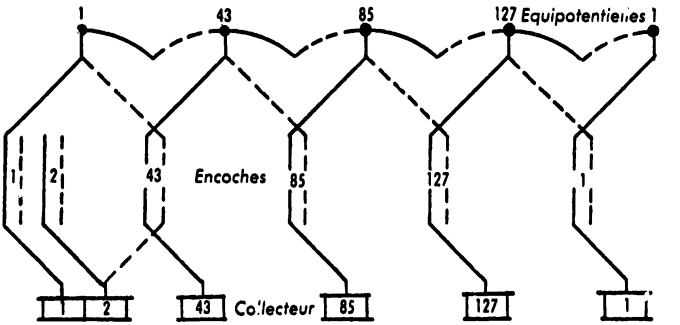


FIG. VII-7. — Variante de la figure VII-6, pour la représentation d'un cycle de connexions équipotentielles.

VII,3. TABLEAU DES CARACTÉRISTIQUES DES PRINCIPAUX ENROULEMENTS DES MACHINES A COURANT CONTINU

Enroulement	Pas résultant	Pas partiels	Pas au collecteur	Conditions nécessaires pour obtenir un enroulement normal
Imbriqué simple $2a = 2p$	$Y = Y_1 - Y_2$ $Y = 2$	$Y_1 = \frac{F}{2p} + 1$ $Y_2 = Y_1 \pm 2$ ou $Y_1 = \frac{F \pm b}{2p} + 1$ $Y_2 = Y_1 \pm 2$	$Y_c = \pm 1$	Y_1 et Y_2 impairs. b nombre entier aussi faible que possible, choisi afin d'avoir Y_1 et Y_2 entiers et impairs. Connexions équipotentielles en multipolaire. + 2 avec les sorties croisées.
Imbriqué parallèle multiple	$Y = Y_1 - Y_2$ $Y = 2u$	$Y_1 = \frac{F \pm b}{2p} + 1$ $Y_2 = Y_1 - Y$	$Y_c = \pm u$	Y_1 et Y_2 impairs. u nombre d'enroulements en parallèle sur l'induit. Connexions équipotentielles.
Ondulé série-simple $2a = 2$	$Y = Y_1 + Y_2$ $Y = \frac{F \pm 2}{p}$	$Y_1 = Y_2$ ou $Y_1 - Y_2 = \pm 2$	$Y_c = \frac{Y_1 + Y_2}{2}$ $Y_c = \frac{K \pm 1}{p}$	Y_1 et Y_2 impairs. K et Y_c premiers entre eux. $\frac{Y}{2}$ premier avec $\frac{F}{2}$.
Ondulé série-parallèle $2a < 2p$	$Y = Y_1 + Y_2$ $Y = \frac{F \pm 2a'}{p}$	$Y_1 = Y_2$ $Y_1 - Y_2 = \pm 2$	$Yc = \frac{K \pm a}{p}$	Y_1 et Y_2 impairs. Connexions équipotentielles. $\frac{K}{a}$, $\frac{p}{a}$, $\frac{N}{a}$ doivent être des nombres entiers. N = nombre d'encoches.

CHAPITRE VIII

ISOLEMENT ET RÉALISATION DES BOBINAGES

VIII,1. ISOLEMENT DES MACHINES ÉLECTRIQUES

Les isolants utilisés pour la construction des machines électriques sont classés suivant la température de fonctionnement adoptée pour un air ambiant jusqu'à 40 °C, soit :

— Classe A

Sont ainsi classées les machines travaillant dans une température inférieure à 100 °C, avec une élévation de température maximum de 60 °C.

— Classe B

Les machines travaillant dans des températures comprises entre 120 et 130 °C, avec une élévation de température de l'ordre de 80 °C.

— Classe H

Les machines fonctionnant à des températures atteignant 180 °C, avec une élévation de température admise de 120 °C.

1,2. Conducteurs employés en bobinage

Les conducteurs employés pour le bobinage sont en cuivre électrolytique recuit. Ils doivent répondre à certaines règles énoncées par les publications C 31-111, C 31-211, C 31-320, C 31-421, éditées par l'Union technique de l'Electricité.

L'aluminium n'est employé qu'a défaut du cuivre, et pour les rotors à cage d'écureuil. Cette substitution réduit de 20 % environ les ampères-tours disponibles, ce qui conduit à augmenter le volume de la machine.

Le fil rond est employé jusqu'à environ 1,6 mm de diamètre. On utilise quelquefois, pour des raisons de place et de forme, des conducteurs méplats.

Lorsque la section d'un conducteur atteint 10 mm², on utilise de préférence l'enroulement à barres. Le conducteur, dans ce cas, est en cuivre plat dont l'épaisseur varie de 0,5 à 3 mm et la hauteur de 1 à 3 cm.

La résistance mécanique à la rupture du cuivre émaillé recuit doit être comprise entre 24 et 26 daN/mm².

VIII,2. CLASSIFICATION DES PRODUITS ISOLANTS UTILISÉS EN BOBINAGE

La classification adoptée en 1962 par la C.E.I., associe les différentes classes de matières avec la température maximale que ces matières peuvent supporter sans dommage en service continu.

2,1. Classification des isolations

Les matières mentionnées dans la colonne 4 sont celles utilisées par le fabricant des produits isolants indiqués dans la colonne 3.

Les matières mentionnées dans la colonne 5 sont celles utilisées par le constructeur électricien pour le traitement des enroulements et des appareils. Dans une classe déterminée, il lui appartient de choisir parmi les matières de la colonne 5 celles qu'il convient d'associer avec les produits choisis dans les colonnes 3 et 4.

Classification des isolations

1	2	3	4	5
Classe		Matière isolante	Matières d'agglomération d'imprégnation ou de revêtement entrant dans la fabrication de la matière de la colonne 3	Matières d'imprégnation qui peuvent être utilisées dans le traitement de l'ensemble isolé
Y	Principales 90 °C	Coton. Soie naturelle. Fibre de cellulose régénérée. Fibre de polyamides. Papier et produits dérivés. Pressboard. Fibre vulcanisée. Bois. Résines aniline-formaldéhyde. Résines urée-formaldéhyde. Fibre d'acétate de cellulose.	Néant.	Non requises
	Subsidiaires	Polycrylates. } Peuvent être limités à moins de 90 °C par la température de ramollissement. Polyéthylène. } Polystyrène. } Chlorure de polyvinyle plastifié ou non. Caoutchouc naturel vulcanisé.	Néant	Non requises
A	Principales 105 °C	Coton. Soie naturelle. Fibre de cellulose régénérée. Fibre d'acétate de cellulose. Fibre de polyamides. Papier et produits dérivés. Papier et produits dérivés. Pressboard. Fibre vulcanisée. Bois. — Imprégnés ou immergés dans un diélectrique liquide	Néant.	Vernis à base de résines naturelles et d'huile siccative : gomme laque, copal et autres résines naturelles ; solutions ou suspensions d'éthers et d'esters cellulosiques.
		Toiles vernies à base de coton, soie naturelle, cellulose régénérée, acétate de cellulose ou polyamides.	Vernis à base de résines naturelles ou synthétiques et d'huile siccative.	Matières mentionnées dans les classes de températures plus élevées.
		Stratifiés bois.	Résine phénolformaldéhyde.	Huiles isolantes et liquides diélectriques synthétiques.

Classification des isolations (suite)

1	2	3	4	5
Classe		Matière isolante	Matières d'agglomération d'imprégnation ou de revêtement entrant dans la fabrication de la matière de la colonne 3	Matières d'imprégnation qui peuvent être utilisées dans le traitement de l'ensemble isolé
		Films d'acétate de cellulose. Films d'acétobutyrate de cellulose. Résines polyesters à chaînes transversales. Emaux oléorésineux des fils émaillés. Emaux à base de résines polyamides des fils émaillés.	Néant	Celles mentionnées ci-dessus ou dans les classes de températures plus élevées.
	Subsidiaires	Elastomères de polychloroprène. Elastomères de butadiène acrylonitrile.	Néant	
E	Principales	—	—	—
	Subsidiaires 120 °C	Emaux aux résines formal-polyvinyle, polyuréthane ou époxyde des fils émaillés.	Néant	Vernis à base d'asphalte ou de résines synthétiques et d'huiles ; résines polyesters à chaînes transversales, résines époxydes. Matières mentionnées dans les classes de températures plus élevées.
		Pièces moulées à charge cellulosique. Stratifiés coton. Stratifiés papier.	Résines mélamine formaldéhyde, phénol formaldéhyde et phénolfurfural.	
		Résines polyesters à chaînes transversales. Films de triacétate de cellulose. Films de téréphtalate de polyéthylène. Fibres de téréphtalate de polyéthylène.	Néant	
		Toiles vernies à base de téréphthalate de polyéthylène.	Vernis à base de résines alkydes et d'huile.	

Classification des isolations (suite)

1	2	3	4	5
Classe		Matière isolante	Matières d'agglomération d'imprégnation ou de revêtement entrant dans la fabrication de la matière de la colonne 3	Matières d'imprégnation qui peuvent être utilisées dans le traitement de l'ensemble isolé
B	Principales 130 °C	Fibre de verre. Amiante.	Néant	Asphalte et résines synthétiques avec huile. Résines polyesters à chaînes transversales. Résines époxydes. (Sous des contraintes mécaniques importantes, ces matières peuventne pasconvenir et des résines phénoliques non modifiées peuvent être nécessaires).
		Tissus de verre imprégné. Amiante imprégné.	Vernis à base de résinessynthétiques et d'huile.	
		Mica aggloméré (seul ou avec un support).	Gomme laque, compounds asphaltiques ou bitumineux. Résines synthétiques modifiées. Résines alkydes. Résines polyesters à chaînes transversales. Résines époxydes.	
		Stratifiés de tissu de verre. Stratifiés amiante. Pièces moulées à charge minérale.	Résines mélamine formaldéhyde. Résines phénolformaldéhyde.	Matières mentionnées dans les classes de températures plus élevées.
	Subsidiaires	Pièces moulées à charge minérale.	Résines polyesters à chaînes transversales.	Matières mentionnées ci-dessus ou dans des classes de températures plus élevées.
		Polymonochlorotrifluoréthylène.	Néant	
F	Principales	—	—	—
	Subsidiaires 155 °C	Fibre de verre. Amiante.	Néant	Résines alkyde, époxyde, polyesters à chaînes transversales et polyuréthane ayant une stabilité thermique élevée. Résines silicone-alkyde et silicone phénol. Matières mentionnées dans une classe de températures plus élevées.
		Tissu de verre imprégné. Amiante imprégné. Mica aggloméré (seul ou avec support).	Résines alkyde, époxyde, polyesters à chaînes transversales et polyuréthane ayant une stabilité thermique élevée. Résines silicone-alkyde.	

Classification des isolations (suite)

1	2	3	4	5
Classe		Matière isolante	Matières d'agglomération d'imprégnation ou de revêtement entrant dans la fabrication de la matière de la colonne 3	Matières d'imprégnation qui peuvent être utilisées dans le traitement de l'ensemble isolé
H	Principales 180 °C	Fibre de verre. Amiante.	Néant	Résines silicones sélectionnées.
		Tissu de verre imprégné. Amiante imprégné.	Résines silicones sélectionnées. Elastomères de silicone.	
		Mica aggloméré (seul ou avec support). Stratifiés de tissu de verre. Stratifié amiante.	Résines silicones sélectionnées.	
		Elastomères de silicone.	Néant	
	Subsidiaires	—	—	—
C	Principales + 180 °C	Mica. Porcelaine et matières céramiques. Verre. Quarts. (N.B. — La température de fonctionnement maximale peut être limitée par les propriétés physiques, chimiques ou électriques à la température de fonctionnement).	Néant	Liants inorganiques tels que verre ou ciment.
	Subsidiaires	Tissu de verre traité. Amiante traité. Mica aggloméré.	Résines silicones possédant une stabilité thermique élevée. (Stabilité limitée au-dessus de 225 °C.)	Résines silicones possédant une stabilité thermique élevée. (Stabilité limitée au-dessus de 225 °C.)
		Polytétrafluoréthylène (Stabilité limitée au-dessus de 250 °C).	Néant	

VIII,3. ISOLEMENT DES FILS ET DES BARRES

Constitution.

L'isolement peut s'effectuer au moyen de coton, de rayonne, de soie, d'émail synthétique.

Généralités.

Les fils isolés à la soie, au coton ou à la rayonne comportent un, deux ou trois guipages dont les couches successives sont enroulées en sens inverse.

Le cordon utilisé pour le guipage du fil est composé de plusieurs brins fortement appliqués et serrés pour éviter tout glissement lors du bobinage.

La soie s'emploie plus particulièrement pour les fils de petites sections, car pour un isolement équivalent, la soie nécessite moins de place que le coton, ce qui est appréciable lorsqu'il s'agit d'un bobinage exécuté avec un grand nombre de conducteurs par encoche. L'isolement à la soie vernie augmente la résistance mécanique du fil.

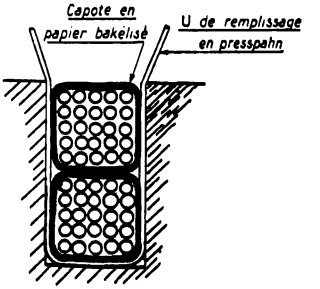


FIG. VIII-1. — Disposition des faisceaux dans une encoche. Les conducteurs sont isolés avec une bande de papier gommelaqué ou bakélisé, enroulée à chaud sur la longueur du tambour d'induit. Un U en presspahn facilite la mise en place des faisceaux et renforce l'isolement. Les parties qui dépassent le tambour seront ensuite coupées au ras du fer.

Le fil émaillé est très employé; il est quelquefois doublé d'un ou deux guipages de coton ou de soie pour les machines à tension moyenne.

On désigne, sous le nom de fil émaillé, des conducteurs isolés avec des vernis à base de résines synthétiques. Ils ne doivent pas être bobinés à basse température, car il arrive que le pliage du fil provoque des fentes très fines dans la couche de vernis.

3,1. Les conducteurs de cuivre émaillé.

Il existe actuellement trois procédés d'émaillage des conducteurs aux vernis synthétiques :

— l'émaillage simple,
— l'émaillage renforcé,
— l'émaillage double.

1° L'émaillage simple.

Il est constitué par un émail gras, noir, de la classe A. 105 °C (résine + huile de lin + solvant), qui peut être plié jusqu'à quatre fois son diamètre au maximum. Cet émail n'est pas polymérisé (durci) afin de lui conserver toute sa souplesse au bobinage; une fois celui-ci terminé,

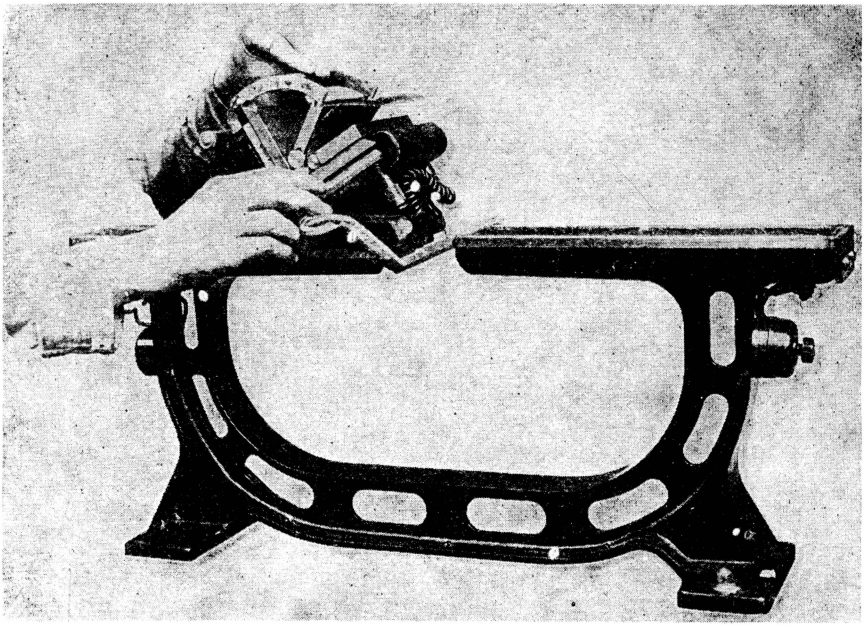


FIG. VIII-2. — Machine à enrubanner les sections d'induits.
Document MAXEI.

on recuit à 130 °C pour finir le séchage. Cet émail est utilisé pour des fils dont le diamètre est compris entre 0,03 mm et 1,2 mm.

2° L'émaillage renforcé.

Il est constitué par un émail de couleur mordorée. Il s'applique sur des fils ronds de 0,05 à 4 mm de diamètre et sur des fils méplats jusqu'à 25 mm^2. Il peut être plié sur son diamètre sans risque et ne nécessite aucun recuit après le bobinage.

La vérification de la résistance à la chaleur de ces conducteurs est faite à 125 °C.

3° L'émaillage double.

Il est applicable aux fils ayant un diamètre égal ou supérieur à 0,04 mm. Il doit s'étendre aux conducteurs à partir de 0,22 mm de diamètre. La vérification de leur résistance à la chaleur a été portée à 150 °C.

3,2. Isolement des conducteurs en barres.

Pour l'enroulement des grosses et moyennes machines, on utilise comme conducteurs des barres de cuivre. Celles-ci sont isolées entre elles par une ou plusieurs bandes de papier Japon, puis le faisceau de barres est enrubanné au coton ou à la soie.

Un deuxième procédé d'isolement des barres consiste à enrubanner une barre sur deux au jaconas, à la toile vernie ou au ruban mica (*fig. VIII-4*).

VIII,4. ISOLEMENT DES SECTIONS ET BOBINES

L'isolement des sections et bobines varie, selon qu'il s'agit d'une machine à courant continu ou à courant alternatif et selon l'échauffement admissible, avec la classe A, B ou H.

Les sections destinées aux induits de dynamos à courant continu sont recouvertes d'un enrubannage en jaconas, ou en silionne pour la classe B, sur toute leur longueur.

L'enrubannage se fait à la main, ou à la machine pour les grandes séries (*fig. VIII-2*). A chaque tour, le ruban recouvre le tour précédent sur la moitié de sa largeur.

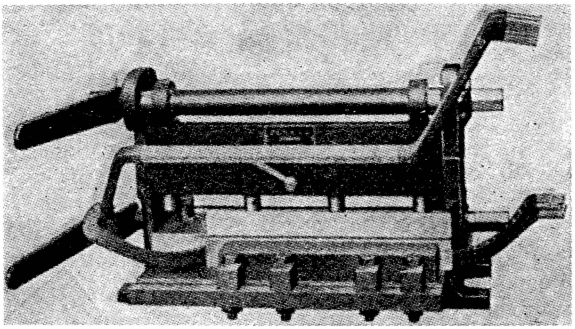


FIG. VIII-3. — Presse rectiligne chauffée électriquement, servant au capotage des faisceaux. On remarque, sur la photographie, une section ouverte à barres en cours de capotage. Document Micafil.

Les entrée et sortie de la section seront particulièrement soignées et renforcées.

Les parties droites (faisceaux), logées dans le fer de l'induit, sont parfois capotées avec du papier gommelaqué pour la classe A, ou avec du micafolium ou du samicafolium pour la classe B. Ces derniers isolants sont constitués par des clivures de mica agglomérées à la gommelaque ou à l'asphalte sur un support en papier mince et résistant.

La capote s'enroule autour du faisceau au moyen d'une presse chauffée soit au gaz, soit à la vapeur ou à l'électricité (*fig. VIII-3*), ce qui permet à la gomme laque de se liquéfier et de coller le tout pour former un ensemble homogène et rigide.

Le même procédé est utilisé pour les sections des grosses machines à courant alternatif.

4,1. Isolement des faisceaux de barres

La partie droite des sections qui se loge dans l'encoche de l'induit est recouverte d'une capote en papier gommelaqué, en mica ou en samicafolium. Cette capote s'enroule

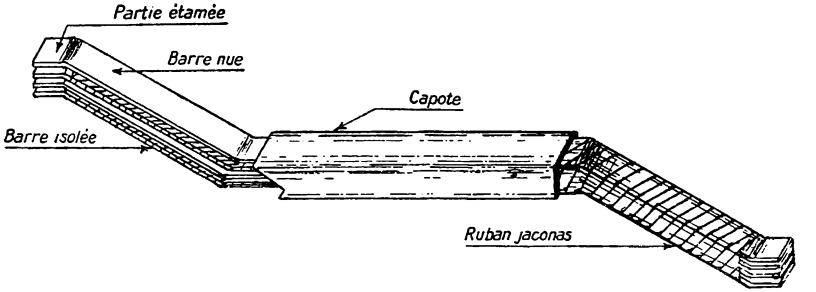


FIG. VIII-4. — Exemple d'isolement d'un faisceau à 4 barres :
a) une barre sur 2 isolée avec du ruban jaconas 0,12 mm, à recouvrement ;
b) l'isolement des têtes de bobine (demi-connexions) comprend un ruban jaconas 0,12 mm, à recouvrement;
c) les faisceaux sont recouverts d'une capote constituée par : 1 tour de micanite de 0,2 mm d'épaisseur, 3 tours de papier gommelaqué de 0,12 mm, à bords jointifs.

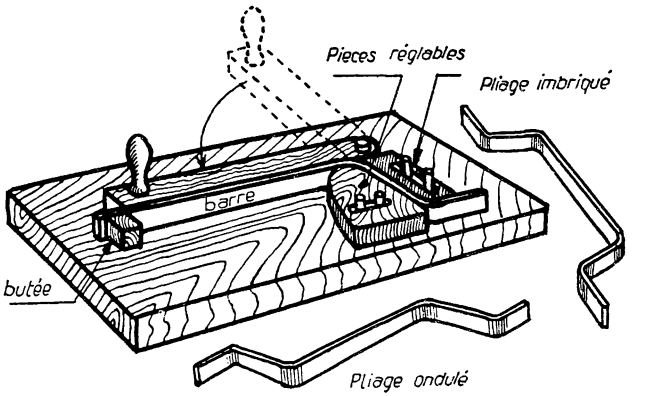


FIG. VIII-5. — Moule universel pour le pliage des barres de bobinage. Avant de plier les barres, on étame leurs extrémités sur 5 cm environ en les trempant dans un bain d'étain. Quand on a fait le pliage des extrémités, il reste à cintrer les deux parties obliques au profil de l'induit.

à chaud au moyen d'une presse, ce qui lui donne, après refroidissement, une grande rigidité.

Les parties obliques des faisceaux sont recouvertes d'un enrubannage en jaconas ou en tresse vernie.

Pour les machines destinées à fonctionner sous une température élevée, on utilise des isolants en ruban micacé, samicacé ou en vétronite.

VIII,5. OUTILLAGE DU BOBINEUR

1 fer à souder électrique 250 à 500 W (d'après l'importance de la machine);
1 pied à coulisse;
1 mètre;
1 marteau de 250 g;
2 pinces à mors parallèles (petite et grosse) ;
1 pince à sertir les œillets (sur boîte à bornes);
1 pince coupante droite;
1 paire de ciseaux;
1 couteau;
1 lime plate demi-douce de 150 mm;
1 lime triangulaire demi-douce de 150 mm;
1 tournevis de 8 mm;
1 chasse-cale;
1 matoir;
2 palettes en bois dur;
1 trusquin;
1 lampe témoin, ou une résistance de 400 Ω.

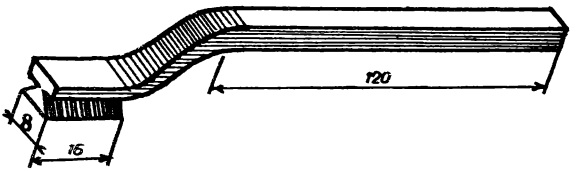


FIG. VIII-6. — Chasse-cale en fer du bobineur.

VIII,6. HABILLAGE DE L'INDUIT

Les isolants qui séparent les enroulements d'une machine de sa masse supportent des contraintes supérieures à celles qui existent entre spires. Ils devront avoir une épaisseur et une rigidité renforcées.

On désigne sous le nom d' « habillage d'induit » le fait d'effectuer cet isolement.

Les défauts d'isolement peuvent se manifester soit par percement, soit par contournement.

On diminue les risques de percement en évitant de frapper ou d'effectuer des pesées sur les isolants, et en ayant soin de ne pas les plier à angle vif.

Pour se garantir contre les contournements, il faut laisser déborder largement les isolants du fer, afin d'augmenter la longueur des lignes que le courant de fuite doit parcourir pour atteindre la masse.

Avant de procéder au bobinage d'un induit, on dispose sur toutes les parties métalliques, recouvertes par l'enroulement, une isolation appropriée.

Les plateaux de serrage des tôles, qui servent également de supports au bobinage, sont isolés au moyen d'une bande de presspahn doublée de micanite souple; le tout est maintenu par un frettage de tresse en coton que l'on gommelaque.

On utilise également des isolants spéciaux recouverts de vernis sur une face, ce qui permet de les coller au fer chaud directement sur les plateaux.

L'isolement des encoches s'effectue au moyen d'une bande de presspahn ou de leathéroïd qui déborde de 5 à 15 mm de chaque côté du tambour d'induit, selon l'importance et la tension de fonctionnement de la machine.

Les capotes d'encoches se font également avec des tissus appelés « Tisolite », pour la classe A. Ces tissus sont constitués par une ou deux toiles vernies plus un Transformerboard.

Pour les classes B et H, les isolants d'encoches sont à base de mica ou de samica sur support carton, coton amiante ou verre, agglomérés avec des vernis appropriés.

VIII,7. PROCÉDÉS UTILISÉS POUR LE BOBINAGE DES MACHINES A COURANT CONTINU ET ALTERNATIF

1. Bobinage au tour automatique.

Il est utilisé pour les petits induits seulement.

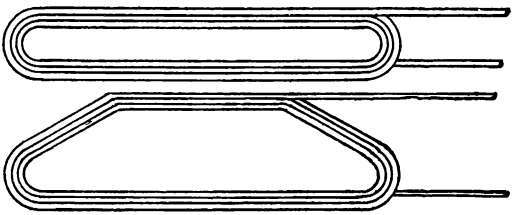


FIG. VIII-7. — Deux types de navettes destinées à faire des sections en manteau.

2. Bobinage en fil tiré (*fig. XV*-5).

Ce type de bobinage est employé principalement pour les machines à courant alternatif à encoches semi-fermées. Il nécessite des aiguilles en fil d'acier, qui tiennent la place des conducteurs dans l'encoche.

Les aiguilles sont remplacées une à une par les conducteurs au cours du bobinage.

Deux personnes sont nécessaires pour effectuer ce travail : l'une d'elle guide le fil dans l'encoche alors que la deuxième le tire.

3. Bobinage avec fil passé (*fig. XIII*-6).

Il est utilisé quelquefois pour l'enroulement des stators de moteurs asynchrones dont l'encoche ne permet le passage que d'un seul fil à la fois.

Le bobineur commence par mettre en place des formes en bois, sur lesquelles il modèlera ses têtes de bobines.

Le fil est pris directement sur le rouleau et passé successivement dans la fente de l'encoche puis sur la forme qui profilera la tête de bobine.

4. **Bobinage en fils égrenés** (*fig. XIII-2*).

Ce bobinage s'exécute avec des sections gabariées dont on égrène les conducteurs dans les encoches.

On utilise plus particulièrement ce procédé pour les petits stators des moteurs à courant alternatif, dont les encoches semi-fermées ne permettent le passage que d'un seul conducteur à la fois. Le travail est plus rapide qu'avec le procédé par fil passé.

5. **Bobinage avec sections gabariées** (*fig. VIII-19*).

Ce genre de bobinage nécessite des encoches ouvertes. Les sections sont exécutées sur des gabarits qui les forment, prêtes à être mises en place après avoir été enrubannées.

Ces sections sont désignées sous le nom de « sections en manteau ».

Ce procédé donne des bobines identiques comme forme et faciles à placer. Il permet d'utiliser soit des fils ronds ou méplats, soit des barres.

6. **Bobinage à barres à encoches ouvertes en courant continu et par enfilade en courant alternatif.**

Ce bobinage est exécuté soit avec des faisceaux de barres, soit avec des sections de barres placées en force dans les encoches ouvertes des induits de dynamos.

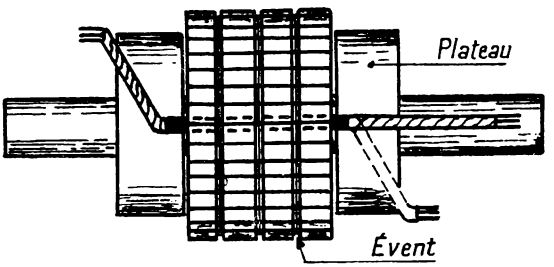


FIG. VIII-8. — Pose par enfilade d'un faisceau de 3 barres dans une encoche fermée de rotor. Le faisceau n'est gabarié que d'un seul côté, l'autre extrémité sera pliée par le bobineur.

En courant alternatif, les encoches étant semi-fermées, les faisceaux ne sont gabariés que d'un seul côté pour permettre l'enfilage des barres dans les encoches; c'est le bobineur qui plie l'autre extrémité lorsque les faisceaux sont en place (*fig. VIII-8*).

VIII,8. ÉTUDE DU DÉVELOPPEMENT D'UNE SECTION DU TYPE MANTEAU

Une section comporte deux parties droites, appelées faisceaux, qui se placent dans le fer de l'induit, et quatre demi-connexions qui relient les faisceaux les uns aux autres.

Pour déterminer la forme que devra avoir un gabarit, il faut posséder un certain nombre de données, comme l'indique l'exemple suivant pris sur un moteur de construction courante. (Voir *fig. VIII-9*).

Diamètre extérieur de l'induit		244 mm
Longueur du fer de l'induit		75 mm
Encoches	hauteur	19 mm
	largeur	8 mm
	nombre	37
Bobinage en 6 pôles	nombre de sections	37
	nombre de spires par section	16
	diamètre du fil nu	1,4 mm
	diamètre isolé avec 2 **couches coton**	1,65 mm
	pas de la section dans les encoches	1 à 7
Recherche des diamètres et des pas de denture	diamètre à l'axe du faisceau inférieur D	= 214 mm.
	diamètre à l'axe du faisceau supérieur D'	= 232 mm.
	pas de la denture t pris sur D $\frac{214 \times \pi}{37}$	= 18,2 mm.
	pas de la denture t' pris sur D' $\frac{232 \times \pi}{37}$	= 19,7 mm.
	jeu entre les demi-connexions	0,75 mm.

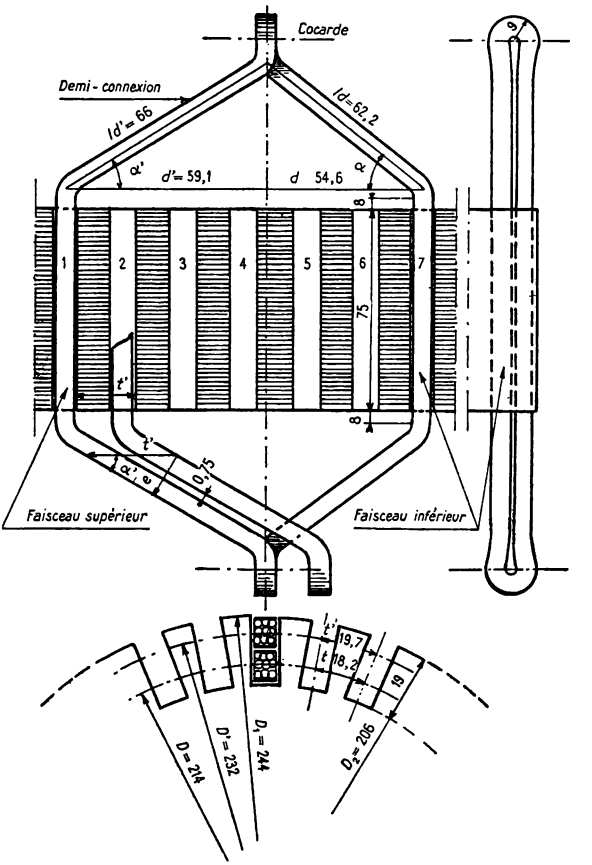


FIG. VIII-9. — Étude d'un gabarit de bobinage destiné à mouler des sections du type manteau. L'induit comporte 6 pôles, 37 encoches, 37 sections, enroulement imbriqué avec $Y_1 = 1$ à 7.

Les cocardes, déportées vers la droite sur la figure, sont en réalité dans l'axe de la section quand cette dernière est en place sur l'induit. (Voir figure suivante).

Calcul des angles α et α'

Sinus α :

$$\frac{e}{l} = \frac{\text{largeur de l'encoche + jeu}}{\text{pas de la denture au diamètre moyen de la section}}$$

sinus α :

$$\frac{e}{l} = \frac{8 + 0{,}75}{18{,}2} = 0{,}481 \qquad \text{et} \qquad \alpha = 28°45'.$$

sinus α :

$$\frac{e}{l'} = \frac{8 + 0{,}75}{19{,}7} = 0{,}444 \qquad \text{et} \qquad \alpha' = 26°22'.$$

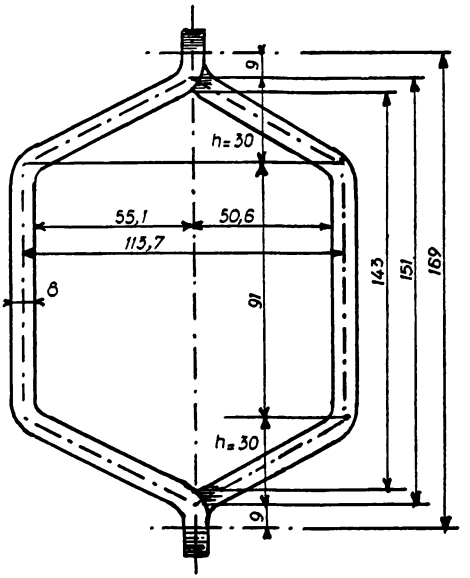


FIG. VIII-10. — Développement de la section calculée d'après la figure VIII-9. La hauteur h peut se relever sur épure ou se calculer (h = sin $\alpha' \times ld'$ = sin 26° 22' × 66 = 30 mm).

Les demi-cocardes sont considérées chacune comme un cercle de 18 mm de diamètre, d'où la cote 9 mm à partir du sommet du point de rencontre de ld et ld'.

Pour la construction du gabarit, il faut retrancher les 2 demi-épaisseurs de faisceaux, soit : 113,7 — 8 = 105,7 mm pour la largeur et additionner : 91 + 60 + 18 = 169 mm pour la longueur.

Longueur des demi-connexions $l\,d$ et $l\,d'$

Le pas de la section dans les encoches étant de 0 à 6, chaque demi-connexion embrasse $\frac{6}{2} = 3$ (pas de denture), d'où :

$$d = 3 \times 18{,}2 = 54{,}6 \text{ mm.}$$

$$l\,d = \frac{d}{\cos \alpha\ 28°45'} = \frac{54{,}6}{0{,}877} = 62{,}2 \text{ mm.}$$

$$d' = 3 \times 19{,}7 = 59{,}1 \text{ mm.}$$

$$l\,d' = \frac{d'}{\cos \alpha'\ 26°22'} = \frac{59{,}1}{0{,}896} = 66 \text{ mm.}$$

Longueur de la section

longueur des faisceaux (75 + 16) × 2..	182	mm
longueur des demi-connexions (62,2 + 66) × 2.....	256,5	mm
longueur des cocardes, correspondant sensiblement à deux cercles de 18 × 3,14 × 2.....	113	mm
longueur totale de la section.....	551,5	mm

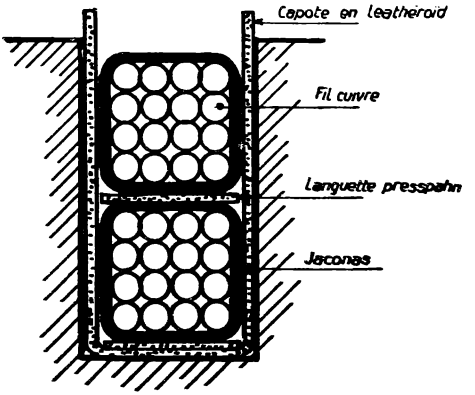


FIG. VIII-11. — Coupe d'une encoche avec ses deux faisceaux. L'isolement des faisceaux varie d'après la tension de la machine et la conception du fabricant. Si les faisceaux sont enrubannés dans la partie fer de l'induit, il est nécessaire de placer entre eux une languette. Par contre, si les faisceaux sont capotés au papier bakélisé ou à la micanite, la languette en presspahn n'est pas nécessaire.

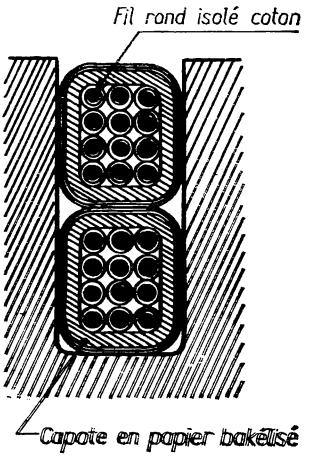


FIG. VIII-12. — Coupe d'une encoche ouverte, avec ses deux faisceaux capotés au papier bakélisé. Les faisceaux sont placés directement dans l'encoche, sans autre isolement.

VIII,9. CONFECTION DES GABARITS DES SECTIONS DE BOBINAGE

Les sections de bobinage peuvent être soit enroulées en « développante », soit en « manteau ». C'est de ce dernier type que nous allons parler tout particulièrement.

La réalisation des sections de bobinage prêtes à la pose s'effectue soit au moyen d'un gabarit à formes successives, soit avec un gabarit à forme directe.

L'enroulement des bobinages d'induit se faisant généralement sur deux plans, on a dans chaque encoche un faisceau inférieur logé au fond de la rainure, et un faisceau supérieur placé au-dessus du premier.

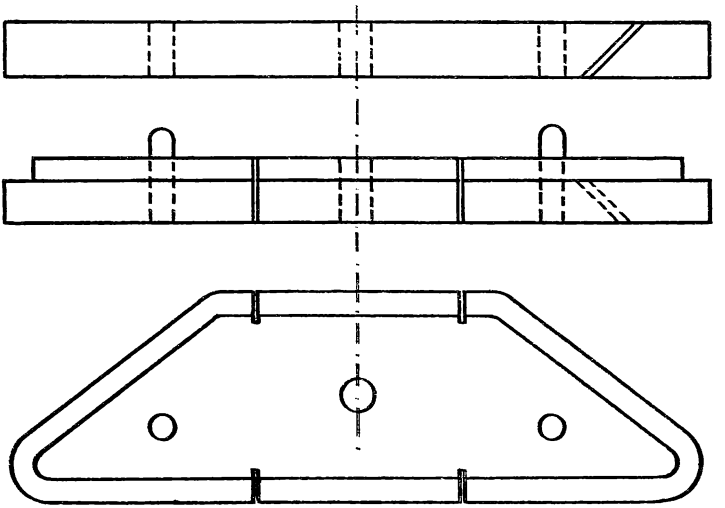


FIG. VIII-13. — Dessin d'un gabarit à formes successives du type « navette », vu en élévation et dessus.

Cette disposition conduit à former des sections dont les demi-connexions passent d'un plan à l'autre au moyen de boucles appelées « cocardes », placées aux deux extrémités des sections.

9,1. Les gabarits à formes successives

Ils se composent d'une pièce en bois, longue et étroite, appelée « **navette** », sur laquelle sont bobinées les sections.

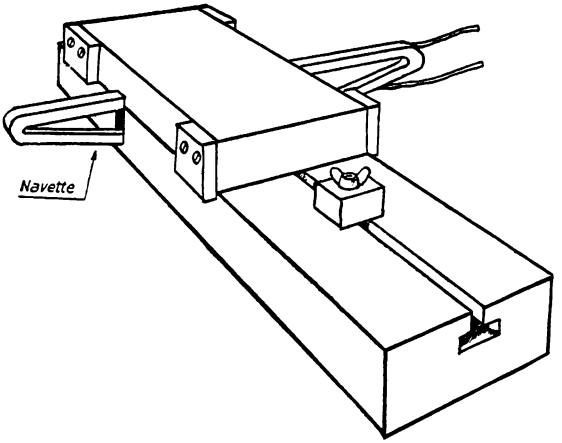


FIG. VIII-14. — Appareil à ouvrir les navettes. La navette est introduite dans un logement aménagé d'une part dans le socle qui est fixe et, d'autre part, dans la partie mobile. En faisant glisser cette dernière, on ouvre la navette qui va former une section en manteau.

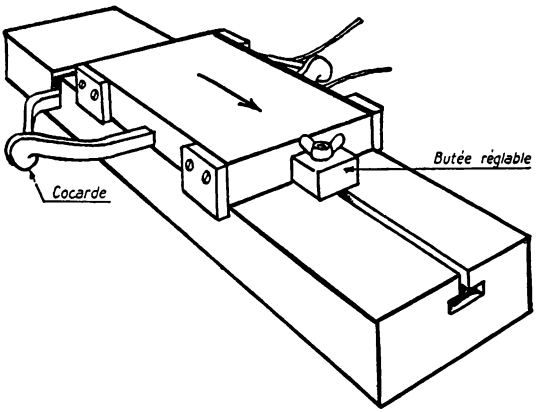


FIG. VIII-15. — La navette est ouverte et les cocardes formées. Une butée réglable permet de se servir de l'appareil pour différentes tailles de sections, du type « manteau ».

Les deux faisceaux sont ensuite séparés et les demi-connexions cintrées au profil du tambour d'induit.

La construction des navettes est assez simple, tandis que l'appareil à ouvrir et à cintrer simultanément est relativement compliqué. C'est pourquoi on réserve ce gabarit pour la confection des sections en grandes séries.

Certains appareils à ouvrir sans cintrer sont toutefois d'une réalisation assez facile, comme l'indiquent les *figures VIII*-14 et *VIII*-15.

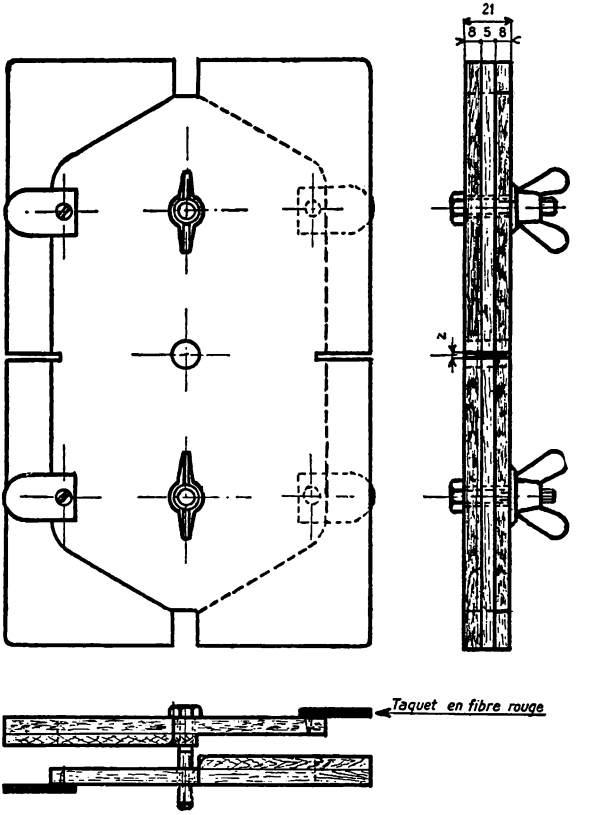


FIG. VIII-16. — Dessin d'un gabarit à forme semi-directe qui donne des sections du type manteau. Les cocardes sont formées, mais la section est plate, il faut la cintrer sur une forme, ou simplement sur l'induit en la plaçant.

Le cintrage préalable n'est pas indispensable s'il s'agit de petits induits.

9,2. Les gabarits à forme directe

Ils permettent d'enrouler et de cintrer les sections en une seule manipulation.

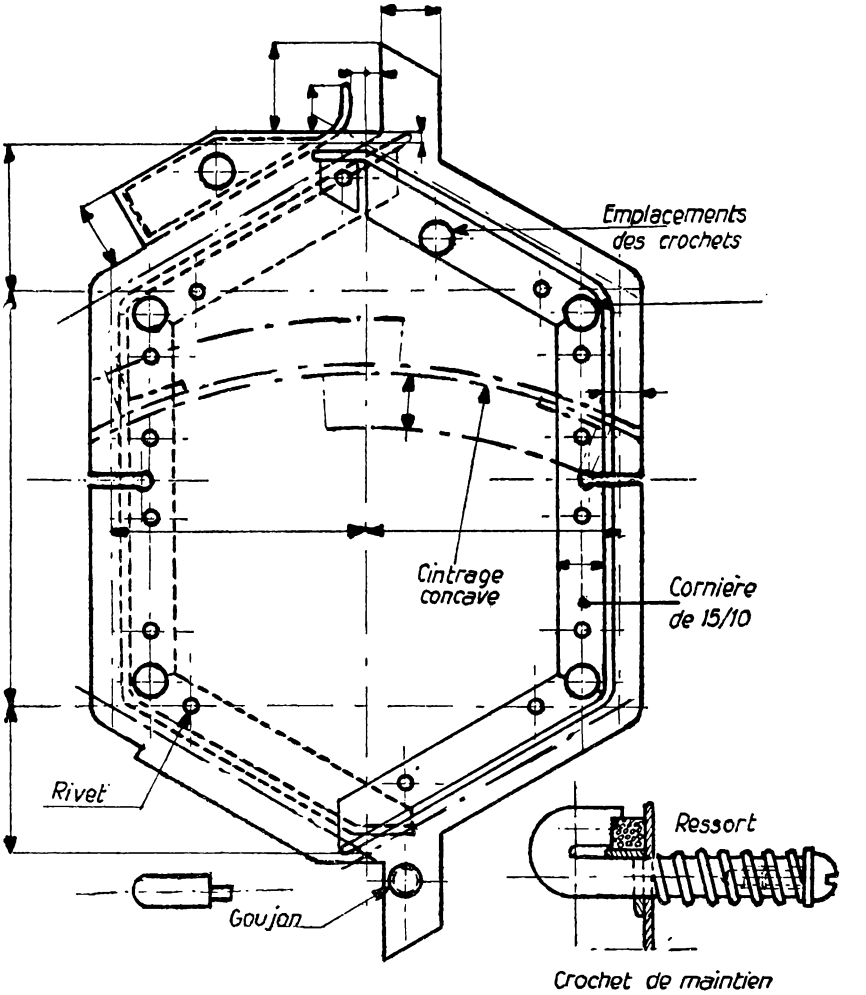


FIG. VIII-17. — Gabarit métallique à forme directe pour la confection en grande série des sections de bobinage.

Ils peuvent être conçus d'une façon semi-directe, comme l'indique la *figure VIII-16*, ce qui permet de les construire à peu de frais pour la préparation de quelques sections seulement, s'il y a lieu.

Avec ce genre de gabarit, on obtient des sections plates dont les demi-connexions restent à cintrer, soit à la main sur l'induit au fur et à mesure de leur pose, soit sur un mandrin au profil du tambour d'induit.

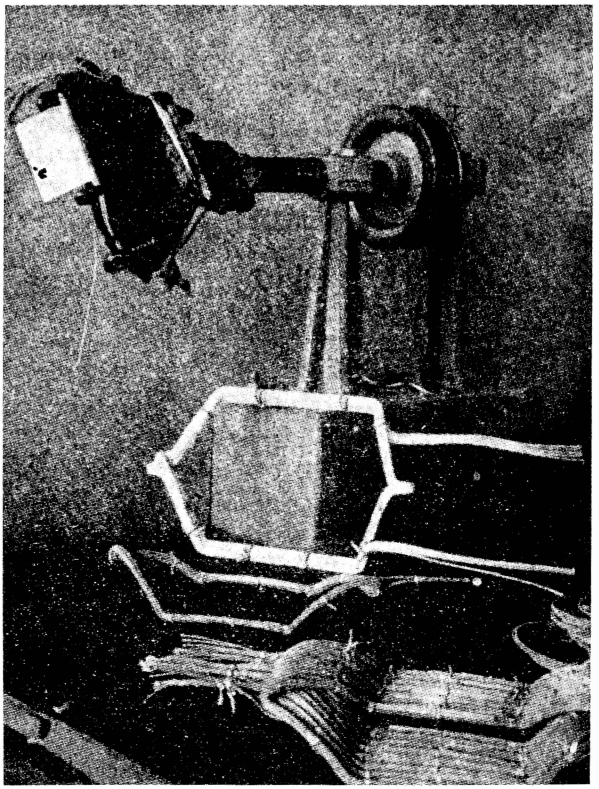


FIG. VIII-18. — Bobineuse à gabarit métallique à forme directe, pour la confection des sections. On remarque, au pied de la machine, deux types de sections fabriquées avec ce dispositif.

9,3. Les gabarits industriels à forme directe

Ils sont d'une construction plus compliquée, ce qui limite leur emploi pour la fabrication des sections en grandes séries. Ils sont composés d'une plaque en tôle ouvragée qui permet d'exécuter les sections à leur forme définitive.

Il est à remarquer que, quel que soit le modèle de gabarit adopté, celui-ci doit tenir compte du fait que le faisceau logé au fond de l'encoche a ses demi-connexions plus courtes que celles des faisceaux du plan supérieur dont le rayon est plus grand.

Ce détail particulier nécessite quelques calculs dont un exemple est donné par la *figure VIII*-9.

En pratique, lorsqu'il s'agit de la réparation d'une partie de bobinage, ou du rebobinage d'un induit, on peut confectionner un gabarit du type simple en se servant uniquement d'une section prise sur l'induit défectueux. Celle-ci servira de modèle pour exécuter le gabarit.

VIII,10. MISE EN PLACE DES SECTIONS SUR UN TAMBOUR D'INDUIT

Le tambour comporte des encoches, dans lesquelles on loge les faisceaux.

Ceux-ci peuvent être au nombre de 1, 2, 4, 6, etc..., dans une seule encoche.

Pour faciliter la compréhension de la démonstration, on prendra un enroulement imbriqué à deux faisceaux par encoche, avec rainures ouvertes.

Le pas de la section sur l'induit étant connu, l'enrouleur se place en face de l'induit, le collecteur à sa gauche, et met dans l'encoche un faisceau inférieur. Celui-ci se reconnaît en ce sens qu'il a un développement moins grand que le faisceau supérieur, qu'il s'agisse d'un faisceau à barres ou d'une section gabariée en manteau.

Après avoir placé le premier faisceau inférieur, l'enrouleur en place un second dans l'encoche voisine, sans s'occuper des faisceaux supérieurs. Il continue ainsi jusqu'au moment où il a placé suffisamment de faisceaux inférieurs dans les encoches pour commencer à disposer ses faisceaux **supérieurs (*fig. VIII*-19).**

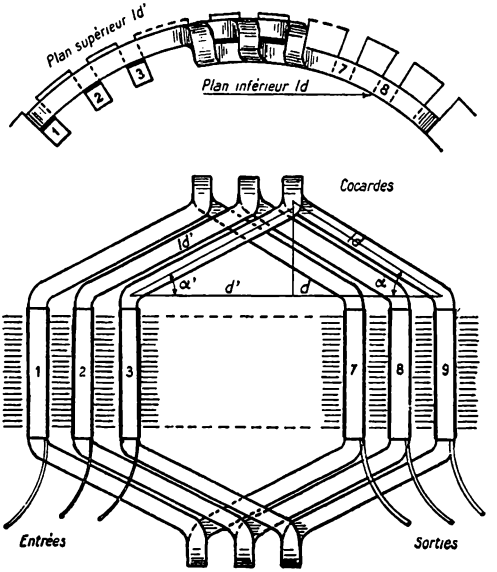


FIG. VIII-19. — En haut, vue de profil des demi-connexions de trois sections mises en place sur l'induit. Cette figure représente un pas d'encoche quelconque, mais en admettant un pas $Y = 7$, on constate que la cocarde de la section de droite se trouve dans l'axe des encoches 3 à 9, alors que, sur la figure du bas, d' a une longueur supérieure à d, du fait de la représentation panoramique qui montre que d' est supérieur à d.

Ce moment arrive lorsqu'il a atteint le pas de la section. A partir de là, il place définitivement les deux faisceaux de chaque section jusqu'à la rencontre des faisceaux supérieurs du début, qui sont demeurés soulevés au-dessus des encoches.

Le bobineur continue son enroulement en disposant ses faisceaux inférieurs sous les faisceaux supérieurs,

puis, lorsque toutes les encoches sont garnies de faisceaux inférieurs, il rabat les faisceaux supérieurs dans les encoches. Le bobinage est terminé; il reste à faire la liaison des faisceaux au collecteur (*fig. VIII*-31).

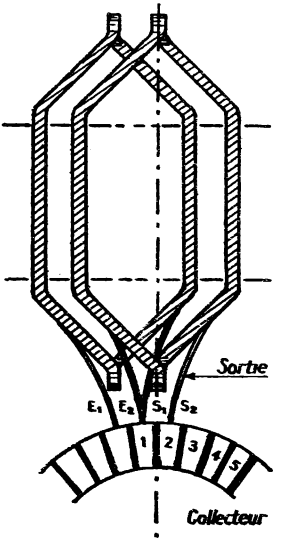


FIG. VIII-20. — Liaison au collecteur d'une section d'un bobinage imbriqué. Les sections étant en place, on en choisit une dont on reporte l'axe sur le collecteur. On connecte sa sortie à la lame 2 placée à droite de l'axe, puis successivement toutes les sorties en respectant l'ordre des sections. Les sorties étant en place, on dispose une bande de toile huilée ou de presspahn sur l'ensemble, puis on connecte l'entrée de la première section repérée à gauche de l'axe, c'est-à-dire à la lame 1 voisine de la sortie 2. Il ne reste plus qu'à brancher dans l'ordre toutes les entrées.

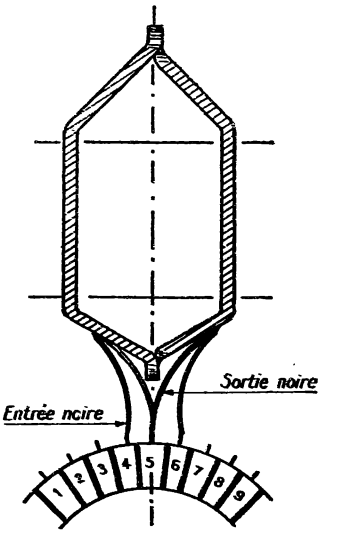


FIG. VIII-21. — La figure représente une bobine composée de 2 sections branchées en imbriqué sur un collecteur. L'entrée et la sortie de chaque section sont recouvertes d'une gaine de coton teinté, qui permet de les distinguer sans erreur. L'entrée noire est reliée à la lame 4 et sa sortie à la lame 5. Sur cette dernière viendra se connecter l'entrée blanche de la 2e section, dont la sortie se relie à la lame 6.

Pour débuter, on opère comme il est dit à la figure précédente. La sortie noire se place sur l'axe de la section, la sortie blanche à sa droite; puis on reprendra l'entrée de la deuxième section (noire) qui viendra sur la lame 6, etc...

VIII,11. MISE AU COLLECTEUR AVEC SECTIONS A FILS

Pour exécuter la liaison au collecteur d'un enroulement imbriqué simple, on commence par chercher l'axe d'une section quelconque, que l'on reporte sur le collecteur, puis on relie la sortie de la section qui correspond à un faisceau inférieur à la lame du collecteur qui se trouve à droite de l'axe de la section choisie. Il ne reste plus qu'à relier dans l'ordre tous les autres faisceaux de la couche inférieure.

La couche inférieure étant reliée au collecteur, on reprend la section choisie au début, dont on a marqué l'entrée et la sortie, et on place l'entrée de la section reliée au faisceau supérieur, sur la lame placée à gauche de l'axe de la section, c'est-à-dire à côté de la première lame choisie pour le début de la mise au collecteur. On a ainsi une mise au collecteur à sorties ouvertes (*fig. VIII-20*).

Les entrées et sorties des sections étant ainsi disposées, on procède au calage des ailettes, avec des petites cales en bois, avant de faire la soudure. Cas d'ailettes du type de la *figure VIII-22*.

Ce calage donne un bon contact entre conducteurs et ailettes et permet ainsi une bonne soudure. Il a également pour but de faciliter le tournage des inégalités des soudures et des ailettes.

Le soudage s'effectue soit au fer à souder électrique, au moyen d'étain, soit au bain d'étain. Dans ce dernier cas, on dresse l'induit sur l'extrémité de l'arbre, côté collecteur, en le maintenant légèrement incliné, afin de tremper les ailettes dans le bain chaud d'étain. On fait pivoter lentement l'induit jusqu'à ce que toutes les connexions soient soudées.

Le décapant utilisé pour cette soudure est la résine pulvérisée ou fondue avec de la benzine.

11,1. Mise au collecteur et soudage des bobinages à barres

Les bobinages à barres comprennent un plan de faisceaux inférieurs et un plan de faisceaux supérieurs. Les barres constituant ces deux plans sont reliées entre elles au moyen de douilles de cuivre étamées, du côté chignon. Du côté collecteur, les barres sont accolées aux ailettes et maintenues en place par des cavaliers de cuivre étamé.

Pour rendre homogènes ces liaisons, on les soude à l'étain au moyen d'un bain de soudure du côté chignon et quelquefois du côté collecteur; sinon, on utilise un fer à souder électrique ou chauffé au gaz. (Voir *fig. VIII*-23).

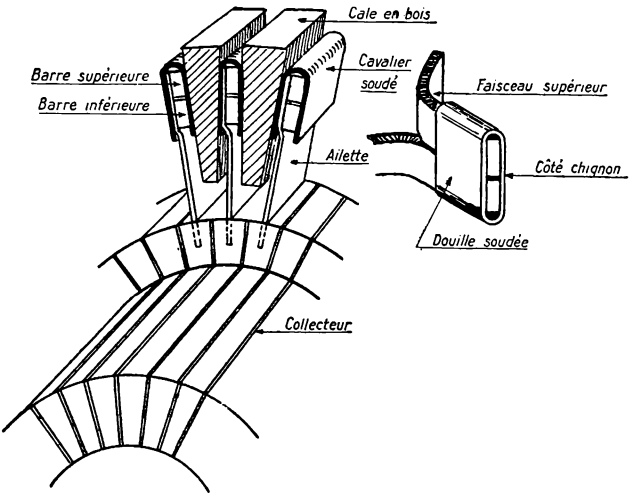


FIG. VIII-22. — Les bobinages à barres dont les sections sont composées de deux faisceaux séparés sont reliés du côté chignon au moyen de douilles en cuivre étamé que l'on soude. Du côté collecteur, les barres s'appuient contre des ailettes légèrement coudées à leur partie supérieure. Un cavalier maintient l'ensemble, qui est soudé à l'étain.

Des cales en bois serrent les pièces entre elles pour former un ensemble homogène qui permet d'obtenir de bonnes soudures. Ces cales disparaissent par la suite.

Il est bien évident qu'avant de souder il faut caler fortement les barres contre les douilles et les cavaliers. Pour cela, on utilise des cales en bois légèrement coniques que l'on fait entrer en force (à petits coups de marteau) entre chaque barre munie de son cavalier ou de sa douille (*fig. VIII-22*).

Le calage étant fait, on effectue le soudage en ayant soin de chauffer suffisamment pour que l'étain coule comme du mercure. Pour cela, on applique le fer sur la douille et on frotte le bout du bâton d'étain (aplati à coups de marteau) sur l'extrémité des barres, jusqu'à ce que l'étain fonde et entre dans la douille.

Comme décapant, on utilise de la résine pulvérisée, ou fondue au moyen de benzine, à l'exclusion de tout autre décapant à base d'acide.

Le soudage des barres étant terminé, on procède au réglage de la circonférence du bobinage avant d'opérer le frettage et le tournage des extrémités de barres.

Les cales seront enlevées en dernier lieu.

Pour réussir un soudage il faut, dans tous les cas, nettoyer les parties à souder, soit à la toile émeri, soit au moyen d'un décapant, puis étamer les deux pièces qui doivent être réunies.

La soudure généralement employée est composée par moitié d'étain et de plomb. Dans certains travaux, on utilise une « soudure dure » qui contient plus d'étain que de plomb. Cette soudure sert parfois pour les machines qui fonctionnent dans des endroits chauds, pour les dynamos des groupes électrogènes.

Pour les moteurs de traction, certains constructeurs utilisent un bain d'étain pur pour les soudures côté collecteur et, du côté chignon, une brasure argent 45 %, cadmium 45 %, cuivre 10 %, température de fusion : 500°C avec borax comme décapant, ou une brasure autodécapante argent 15 %, phosphore 5 %, cuivre 80 %, point de fusion : 720°C.

Ces brasures s'effectuent avec une pince en acier inoxydable chauffée électriquement. La pince communique sa chaleur à la douille à braser jusqu'à la fusion de la brasure d'apport.

11,2. Préparation des barres

L'étamage est une opération qui demande beaucoup de propreté et de soins.

Une soudure mal faite empêche un courant normal de passer et fausse les résultats escomptés aux essais.

Dans tous les cas où une soudure est soumise au passage d'un courant, l'épaisseur de l'alliage d'apport doit être aussi mince que possible.

Toute pièce à souder doit préalablement être décapée et étamée pour offrir quelques garanties de tenir.

11,3. Découpage, décapage et étamage des barres.

Lorsqu'il s'agit d'effectuer un enroulement avec des barres, il est nécessaire de préparer celles-ci en vue de leur assemblage par soudage.

Le cuivre utilisé est méplat à champs arrondis; il est stocké en rouleaux.

Au départ des opérations de préparation des barres, on place le rouleau sur un tambour d'entraînement qui déroule le cuivre. Celui-ci est alors successivement dressé et coupé en barres d'une longueur appropriée au type de machine à laquelle elles sont destinées.

Les barres ainsi obtenues sont ensuite successivement plongées :

— Dans un bac d'eau chaude pour élever la température du cuivre et le dégraisser.

— Dans un bac en ciment (recouvert intérieurement d'une matière plastique résistante aux acides), contenant une solution chaude, de 50 % d'acide nitrique et 50 % d'acide sulfurique. C'est dans cette cuve que s'opère le décapage.

— Dans un bac d'eau chaude, pour les rincer.

— Dans une caisse de sciure de bois, pour les sécher.

Les barres ainsi décapées sont ensuite étamées à leurs extrémités, par groupes de cinq barres que l'on plonge en les agitant dans un bain d'étain à 100 %, porté à 180 °C. On les retire et, à l'aide d'un chiffon de laine, on essuie la partie étamée pour étendre l'étain régulièrement.

Le bain d'étain est renouvelé lorsqu'il contient plus de 4 % de cuivre.

Autre procédé.

1° Le ruban de cuivre est entraîné par une machine qui le dirige successivement dans deux cuves pour procéder à son décapage et à son étamage.

2° A la sortie du bain d'étain, le ruban passe entre deux rouleaux qui le redressent avant qu'il soit lissé et poli par une brosse métallique tournante.

3° Un jet d'air comprimé refroidit le ruban de cuivre étamé qui est ensuite enroulé sur un tambour.

4° Le ruban de cuivre est découpé en barres.

Dans les deux procédés, une canne pyrométrique permet de surveiller la température du bain d'étain.

Certains constructeurs décapent simplement les extrémités des barres en les plongeant dans un vernis de résine décapante, ou dans un liquide décapant sans acide, avant de les tremper dans un bain d'étain.

11,4. Soudage des bobinages

Bobinages avec sections en manteau :

— le soudage n'est nécessaire que pour la mise au collecteur.

Bobinages avec barres :

— Côté chignon, soudage des barres entre elles par l'intermédiaire de douilles.

— Côté collecteur, soudage de la mise au collecteur, avec ou sans cavaliers, selon le type de machine.

Bobinage des stators à fils ronds :

— Soudage à l'arc ou à l'étain des liaisons entre bobines.

Avant d'exécuter un soudage, les deux parties en présence doivent être étamées et enduites d'un produit décapant à base de résine.

Le soudage des mises au collecteur peut être effectué soit au fer à souder, soit plus rarement au bain d'étain.

Le soudage au fer.

Avec le soudage au fer, chaque lame ou ailette est soudée séparément.

Au début, le travail est lent, car il s'agit de chauffer une partie de la masse du collecteur pour atteindre la température de fusion de l'étain (150 °C). Puis, insensiblement, la cadence de soudage devient plus rapide.

On commence en enduisant de résine en pâte les parties à souder, puis on applique le fer électrique ou à gaz sur la

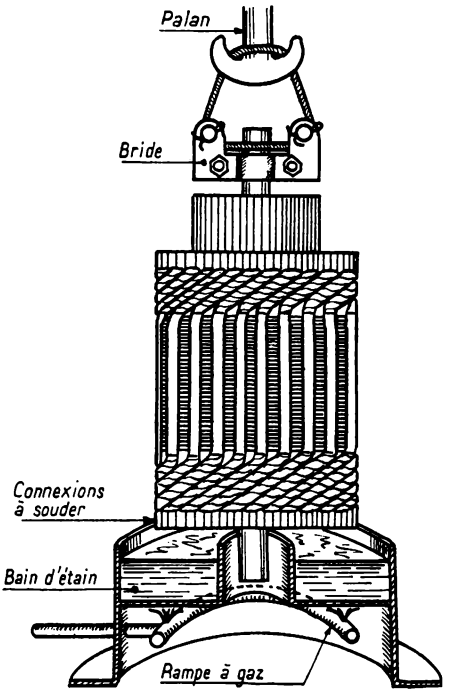


FIG. VIII-23. — Soudage au bain d'étain d'un induit à barres.

connexion. Dès que l'on suppose avoir atteint la température de fusion de l'étain, on approche le bâton d'étain que l'on frotte sur les pièces à souder, jusqu'à ce qu'il y ait fusion. ***Une soudure pâteuse ne tient pas, c'est un collage***

Le soudage au bain d'étain.

Les machines enroulées avec des barres peuvent être soudées au bain. Pour cela, on suspend l'induit verticalement à un palan et on plonge lentement les douilles (côté chignon) dans un bac rempli d'étain en fusion. On attend que le bouillonnement cesse (les connexions ont pris la température du bain, 180 °C), et on relève l'induit, en brossant l'excédent d'étain.

Côté collecteur, le soudage peut s'effectuer en inclinant l'induit suspendu au palan, de telle façon qu'un petit groupe de cavaliers entre en contact avec le bain. Une rotation lente de l'induit, imprimée à la main, permet le soudage successif de toutes les connexions.

11,5. Suppression du faux rond des bobinages

Un bobinage n'est jamais parfaitement cylindrique lorsqu'il est terminé. Il faut y remédier en rectifiant le faux rond.

Pour obtenir la suppression du faux rond, qui est souvent important du côté chignon, on place les deux bouts d'arbre de l'induit sur deux chevalets, ou, entre pointes, sur un tour.

On imprime un mouvement de rotation à l'induit et on présente une craie en face des douilles.

Au cours de cette manœuvre, la craie marque un certain nombre de douilles qui ressortent plus que d'autres.

A l'aide d'un maillet, on frappe légèrement les parties marquées, puis on efface les traces de craie et on recommence l'opération jusqu'à ce que tout le pourtour soit légèrement touché par la craie. L'induit tourne rond, il est prêt à passer au tour pour l'égalisation définitive et la rectification du collecteur.

Il est bien évident que la craie est maintenue par la main appuyée sur un support fixe, lorsqu'on procède à cette opération.

VIII,12. FRETTAGE DES INDUITS

Le bobinage d'un induit de machine électrique constitue une masse qui tend à se déplacer sous l'effet de la force centrifuge, lorsque la machine tourne.

Pour maintenir l'ensemble en place, on frette l'induit (*fig. VIII-24*).

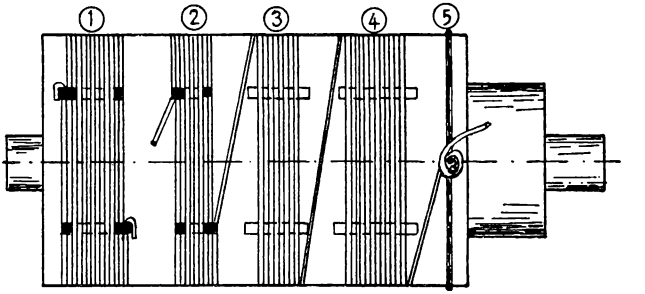


FIG. VIII-24. — Exemple de frettage d'un induit. 1) Frette terminée; 2) Frette en cours de soudage; on replie les plaquettes de laiton étamé sur la frette et on soude les spires à l'étain, puis on coupe les liaisons entre frettes et on replie les extrémités qui seront particulièrement soignées au soudage; 3) Le frettage lie encore les frettes entre elles. Elles seront ensuite séparées. Toutefois, les frettes placées sur le fer de l'induit peuvent conserver cette liaison; 4) amarrage provisoire de la frette à un fil de fer (5) fortement serré sur l'induit. Au départ de la première frette on utilise le même dispositif.

Le frettage consiste à enrouler du fil d'acier étamé ou du fil de laiton sur certaines parties de la périphérie de l'enroulement.

Les fils d'acier utilisés pour le frettage des induits sont en acier amagnétique, constitué comme suit :

— acier à 18 % de chrome et 8 % de nickel;
— acier à 13 % de manganèse.

Le nombre de tours et la section du fil pour chaque frette sont déterminés par la vitesse de rotation de l'induit et le poids du bobinage.

Ces frettes, au nombre de deux, quatre ou six, sont isolées de l'enroulement par une bande de presspahn ou de micanite, qui doit déborder de la frette de 3 à 5 mm de chaque côté.

12,1. Frettage au tour.

Le fil est fortement tendu au moyen de galets tendeurs, puis l'ensemble de chaque frette est soudé à l'étain de façon à former des cercles homogènes de 2 à 5 cm de large.

Lorsqu'on place la première spire de la frette, on dispose sous celle-ci un certain nombre de petites bandes de laiton ou de cuivre étamé, que l'on répartit sur le pourtour de l'induit (tous les 15 cm). Ces bandes, repliées sur la frette, servent à rassembler les spires et à former un agrafage destiné à maintenir le début et la fin du fil de chaque frette. A défaut de tour, le frettage peut s'effectuer à la main.

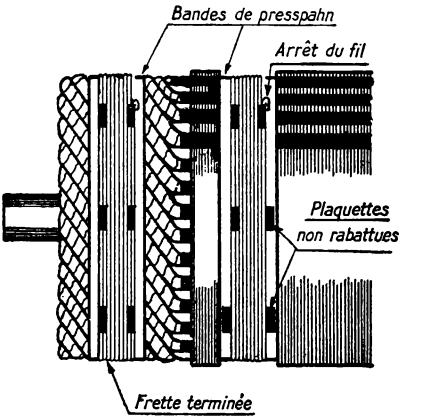


FIG. VIII-25. — Vue partielle du frettage d'un induit. Frette sur chignon et frette en cours de finition sur le tambour d'induit.

12,2. Frettage à la main.

Pour cela on fixe sur le bout d'arbre une manivelle qu'un homme actionne pendant que le second bobineur dirige et tend le fil au moyen d'un tendeur à poulies.

Au cours du frettage, on exécute toutes les frettes sans couper le fil. Ce n'est qu'après avoir replié les bandes de maintien et étamé les frettes que l'on coupe le fil qui relie les frettes entre elles.

Il ne reste plus qu'à replier l'extrémité des fils sur les agrafes et donner un point de soudure à celles-ci pour terminer les frettes.

Les induits à encoches semi-fermées et à cales isolantes trapézoïdales ne nécessitent des frettes que sur le bobinage qui déborde des encoches. Par contre les rotors à encoches ouvertes ont également des frettes sur le noyau de fer. ***Pour diminuer l'entrefer de ces induits,*** on pratique dans les tôles un logement destiné à recevoir chaque frette. Cette dernière se trouve alors sensiblement au niveau du tambour d'induit, *fig. VIII-25.*

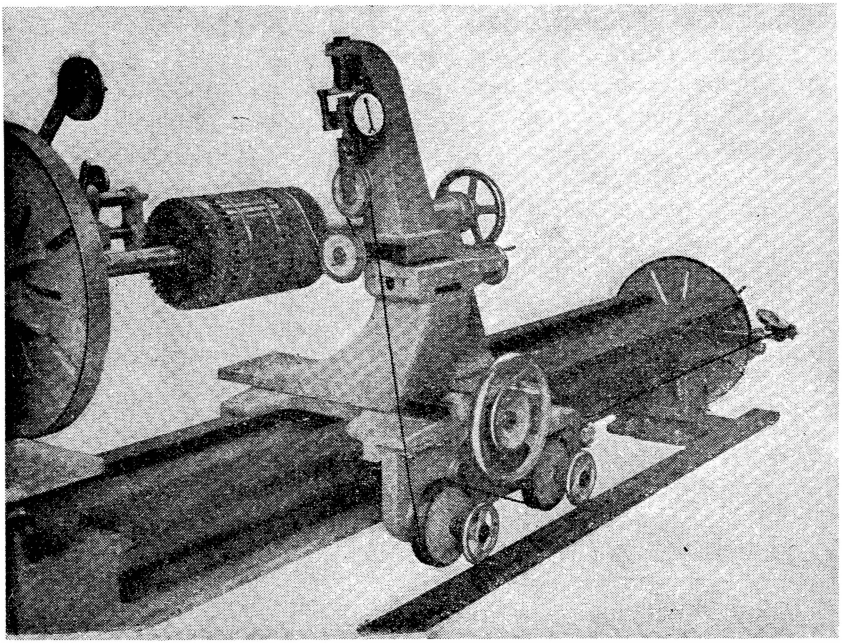


FIG. VIII-26. — Frettage d'un induit sur un tour équipé avec un dispositif de la Manufacture MAXEI.

12,3. Frettage des rotors en ruban de fibres de verre préimprégné.

Ce ruban tend à remplacer les frettes en bronze ou en acier, magnétique ou non, employées pour le frettage des induits. Il supprime les problèmes résultant des courants de Foucault.

Ce ruban peut être placé directement sur l'enroulement, sans support isolant (presspahn, etc.).

Pour une même résistance mécanique, les frettes en ruban de fibres de verre n'occupent pas plus de place que les frettes en acier avec support isolant.

Résistance à la rupture des rubans de fibres de verre.

Largeur du ruban mm	Force de rupture en kg par spire			
	Etat B de la résine Livraison 20 °C	Etat C de la résine Durci		
		20 °C	130 °C	150 °C
10	160	360	270	180
19	320	720	540	360
25	425	960	720	480

Exemple d'équivalence (Micafil, S.A. Zurich).

Frette en fil d'acier de 1,4 mm de diamètre, 90 kg/mm², température de service 130 °C.

0,51 spire de ruban de 10 mm de largeur correspond à 1 spire de fil d'acier, ce qui fait que 102 spires de ruban de fibres de verre de 1 cm peuvent remplacer 200 spires d'acier.

Ces nombres sont tirés d'un abaque destiné à faire le rapport entre frette acier et frette en ruban de fibres de verre et de résine polyester.

12,4. Caractéristiques des rubans verre-polyester.

Ces rubans sont livrés aux dimensions suivantes :

— en largeur de 10 mm : par rouleau de 230 m et de 2 750 m;

— en largeur de 19 mm : par rouleau de 92 m, de 184 m et de 1 800 m;

— en largeur de 25,4 mm : par rouleau de 92 m, de 184 m ou de 1 380 m.

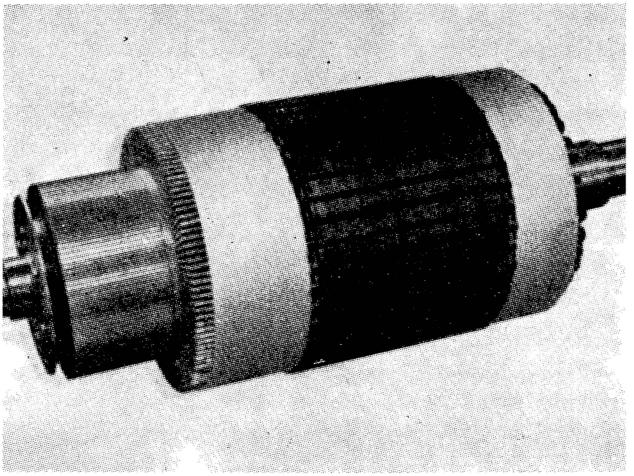


FIG. VIII-27. — Induit fretté avec un ruban à base de fibres de verre et de résine polyester. Document Micafil.

Les rubans de la marque Res-i-Glas sont livrés à l'état B, c'est-à-dire avec une résine à demi polymérisée.

Après le frettage, les bandages doivent subir un traitement thermique de façon à durcir la résine (passage à l'état C).

Cette polymérisation a lieu en 5 h, à 150 °C ou en 12 à 15 h à 135 °C.

12,5. Réalisation des frettages en ruban verre-polyester.

Avant le frettage, il faut fixer le bobinage dans sa position définitive, par martelage ou par un cerclage provisoire.

Ce frettage nécessite un appareil spécial destiné à donner la tension de serrage nécessaire. Cet appareil peut soit se placer sur le tour, soit être indépendant du tour à bobiner.

Avant de commencer le frettage, il est nécessaire de connaître :

— la tension à donner au ruban, 75 kg, 100 kg, etc.,

— le nombre de spires à enrouler (en fonction du type de machine),

— la largeur du ruban, 10 mm, 19 mm, 25,4 mm,

— la disposition à adopter pour opérer l'enroulement : le bord à bord ou le ½ recouvrement.

Le ½ recouvrement s'utilise pour les développantes d'induit et les équipotentielles.

Le bord à bord s'emploie pour le frettage des barres dans la partie feuilletée des induits, et dans le frettage des radiales des collecteurs.

Un compteur de tours est nécessaire.

Comment débuter le frettage.

La première spire sera mise à la main. L'extrémité du ruban sera séparée en deux parties sur 15 cm de longueur, rejetées de chaque côté. Le bobineur se servira de ces deux brins pour serrer la première spire, sur laquelle il placera la deuxième spire, en se servant de l'appareil de frettage, sous une tension d'environ 50 kg.

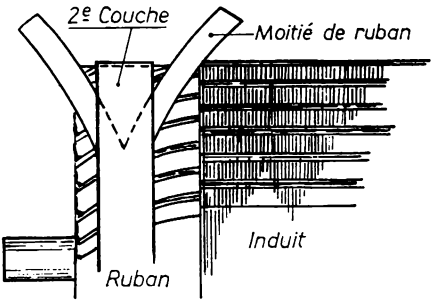


FIG. VIII-28. — Début du frettage d'un induit au ruban de fibres de verre. La première spire se place à la main. On coupe auparavant l'extrémité du ruban sur une quinzaine de centimètres, dont on rejette les deux moitiés de chaque côté, puis on place la deuxième spire en se servant des deux moitiés pour tenir la première spire en place.

Pour les spires suivantes, l'appareil sera réglé pour la tension adoptée, qui peut aller jusqu'à 115 kg. Normalement, le frettage se fait avec une traction de 100 kg par cm de largeur du ruban.

Les extrémités de la première spire seront coupées en fin de frettage.

Les couches de ruban se succèderont jusqu'à épuisement du nombre de spires prévues (5 à 8 couches et plus).

Durant l'enroulement, on veillera à former une frette ayant une section droite rectangulaire.

L'arrêt du ruban sera effectué autant que possible au milieu de la frette, en utilisant un fer à repasser porté à 135 °C environ.

On applique le fer sur une portion du ruban (15 à 20 cm) pendant 30 secondes, alors qu'il est encore tendu, et on continue ainsi sur la moitié du pourtour au moins. Puis on supprime la tension et on coupe le ruban.

Il ne reste plus qu'à polymériser la frette durant une douzaine d'heures à 135 °C, avant l'imprégnation du bobinage.

VIII,13. ÉQUILIBRAGE DES ROTORS

Il a pour but de compenser les balourds pouvant provenir des cas suivants :

— manque d'homogénéité de la matière ;
— défaut d'usinage ;
— malformation des têtes de bobines ou des barres.

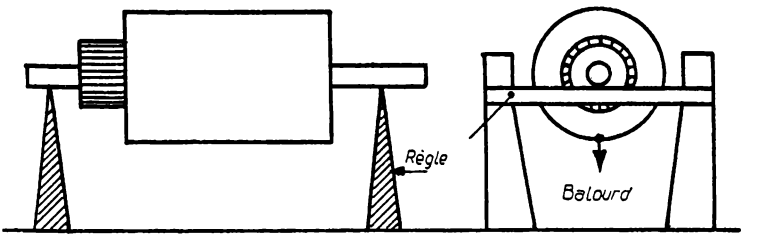


FIG. VIII-29. — Induit à vitesse lente placé sur règles pour l'opération d'équilibrage statique. L'induit s'immobilise quand le balourd est au point bas.

Ces balourds ont pour inconvénient de provoquer une usure rapide des coussinets ou des roulements à billes.

Le rétablissement de l'équilibre s'effectue par adjonction de matière sur le plateau de l'induit, ou par enlèvement de matière en perçant des trous dans le plateau.

La méthode d'équilibrage varie avec le type de machines.

13,1. L'équilibrage statique

Il s'applique aux induits à vitesse lente. Pour vérifier l'équilibrage, on déplace l'induit sur deux règles et on cherche sa position d'équilibre, ce qui permet de déterminer l'endroit du balourd.

On compense le balourd en fixant des masses en fonte à l'opposé.

13,2. L'équilibrage dynamique

Ce procédé est utilisé **pour les induits à vitesse élevée.**

La machine à équilibrer est entraînée à une vitesse de rotation appropriée, afin qu'une pointe d'acier dirigée vers l'arbre blanchi à la craie, trace la portion de circonférence où se situe le balourd, ce dernier rapprochant l'arbre de la pointe.

L'essai se fait dans les deux sens de rotation : le recoupement des parties marquées donnera la position du balourd, qui pourra être supprimé à l'aide de masses métalliques que l'on fixera sur le disque d'équilibrage prévu sur l'induit.

VIII,14. INDUITS DE DÉMONSTRATION

L'apprentissage du métier de bobineur ne peut se faire d'une façon complète qu'en bobinant des machines industrielles. Or, à l'usine ou chez l'artisan, l'apprenti ne sera autorisé à réaliser un enroulement qu'après avoir servi de manœuvre à des spécialistes pendant plusieurs semaines et souvent plusieurs mois.

En raison du prix élevé du fil employé à la réalisation des bobinages, l'employeur ne confiera une machine à un apprenti que s'il est persuadé que l'enroulement sera exécuté de façon parfaite.

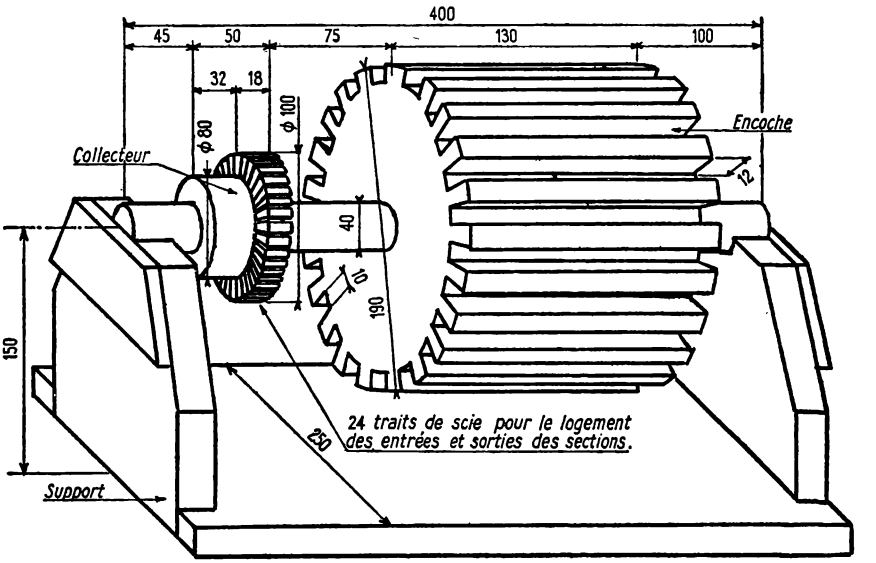


FIG. VIII-30. — Induit de démonstration en bois de 24 encoches, permettant d'exécuter à peu de frais les réalisations de bobinages étudiés en cours. Ces induits peuvent être construits avec un nombre d'encoches varié. Des induits à 24 et à 37 encoches, par exemple, permettent un nombre appréciable de combinaisons. Ainsi, avec un induit à 37 encoches, on peut bobiner un 36 encoches en laissant vide une rainure. Les traits de scie faits sur la périphérie du collecteur représentent les ailettes dans lesquelles on loge les entrées et les sorties des sections.

Dans les établissements scolaires, où le bobinage ne représente qu'une partie de l'apprentissage, comme c'est le cas pour les élèves électriciens des Lycées et Collèges techniques, ce genre d'initiation n'est pas applicable, le temps réservé à ces exercices étant limité et le prix des matériaux nécessaires élevé.

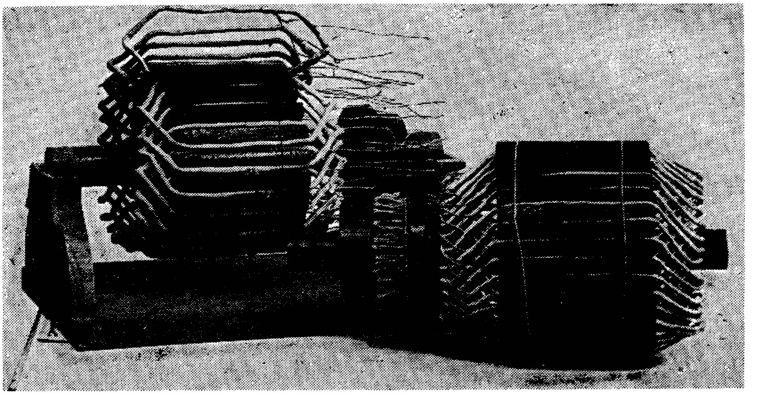


FIG. VIII-31. — A gauche, un induit de démonstration de 24 encoches en cours de bobinage. Pour placer les 4 derniers faisceaux inférieurs, on a relevé les 4 faisceaux supérieurs des sections mises en place au début. Il ne reste plus qu'à rabattre ces faisceaux pour terminer l'enroulement.

A droite, un induit à 37 encoches terminé.

Pour pallier dans une certaine mesure ces deux inconvénients, on peut utiliser des induits de démonstration en bois et des sections en manteau exécutées très simplement, comme il est indiqué sur la *figure VIII-32.*

Ce procédé permet aux professeurs de faire réaliser à leurs élèves les différents bobinages étudiés au cours, avec des sections qui peuvent servir plusieurs fois.

Par contre, pour les jeunes gens devant préparer le C. A. P. de bobineur, ces applications démonstratives devront être suivies de réalisations effectuées sur des tambours d'induit de machines normales.

L'entraînement acquis en bobinant les induits de démonstration développera l'habileté manuelle d'une façon appréciable et permettra à l'élève d'exécuter ses mises au collecteur avec plus de confiance.

Remarque : Les précautions à prendre pour l'isolement à la masse ne seront applicables et surtout vérifiables qu'avec des tambours d'induits réels.

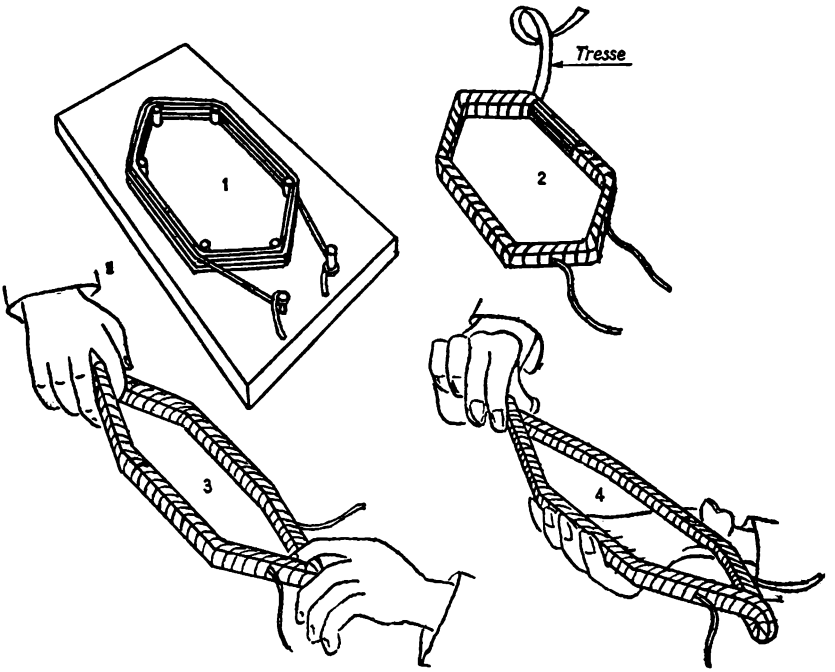


FIG. VIII-32. — Les sections destinées à être placées sur les induits de démonstration peuvent se faire en utilisant une planchette sur laquelle on dispose six pointes sans tête qui forment le gabarit de la section.

Pour former les cocardes, on allonge la section et on fait faire un quart de tour aux extrémités. Avant de retirer les sections du gabarit, il faut prendre soin d'attacher les spires au milieu des faisceaux.

Une section peut comporter une dizaine de spires de fil émaillé ou isolé au coton, de 1,0 mm de diamètre. L'enrubannage se fait avec de la tresse de 15 mm de largeur.

CHAPITRE IX

ESSAIS DIÉLECTRIQUES ET IMPRÉGNATION DES BOBINAGES

IX,1. PROCÉDÉS ET TENSIONS EMPLOYÉS DANS LES ESSAIS

Ces épreuves comportent deux phases :

1° Une épreuve d'isolement du bobinage, que l'on appelle « essai à la masse »;

2° Une recherche des courts-circuits entre spires et entre sections.

1,1. Essai à la masse.

Pour vérifier si le bobinage d'une machine électrique est bien isolé des parties métalliques de celle-ci, on lui fait subir une épreuve de rigidité diélectrique, que l'on appelle « essai à la masse ».

On se sert, pour cet essai, d'un petit transformateur élévateur, dont on relie l'une des bornes du secondaire à la masse métallique de la machine et l'autre au bobinage.

A la mise sous tension, il ne doit passer aucun courant si l'isolement du bobinage est correct. Dans le cas contraire, le courant passe en contournant l'isolant ou en le perforant.

Un arc électrique, ou un simple dégagement de fumée, révèle l'endroit du défaut.

Les tensions d'essai adoptées par l'Union Technique de l'Électricité sont :

a) **2 *U*+500 V, pour les machines dont la tension de fonctionnement est inférieure à 100 V.**

b) **2 *U*+1 000 V, avec un minimum de 1 500 V pour les autres machines.**

Pratiquement, les constructeurs augmentent cette tension de 1 000 V, afin de s'assurer une plus grande marge de sécurité dans l'isolement de leur machine.

Le transformateur utilisé pour ces essais est un appareil élévateur de faible puissance, afin de limiter les dégâts produits par l'amorçage en cas de mauvais isolement du bobinage.

Lorsqu'on procède à ces essais, on relie préalablement à la terre la masse de la machine à essayer, car la tension utilisée est dangereuse pour l'organisme humain.

L'isolement des bobinages par rapport à la masse métallique des machines électriques doit être poussé au maximum.

Malgré toutes les précautions prises, un très faible courant circule toujours à travers les isolants, passant du bobinage à la masse. **Ce courant est appelé courant de fuite.**

Les inducteurs des machines électriques doivent avoir une résistance d'isolement comprise entre 200 000 et 500 000 Ω, et les stators des machines à courant alternatif un isolement supérieur à 10^6 Ω.

IX,2. RECHERCHE DES DÉFAUTS DANS UN BOBINAGE D'INDUIT

2,1. Recherche d'un court-circuit.

Après l'épreuve d'essai à la masse, il convient de vérifier s'il n'existe pas de court-circuit dans les spires.

Cet essai peut s'opérer avec quatre procédés différents.

1° Au moyen d'un grognard (*fig. IX-1*). — Cet appareil est formé d'un électro-aimant en forme de U que l'on alimente avec une source de courant alternatif à 110 ou 220 V.

Pour faire l'essai, on place l'induit sur le grognard et on lui fait faire lentement un tour complet en promenant sur la périphérie de l'induit une plaquette de tôle d'acier mince, de 0,5 à 1 mm d'épaisseur.

Si une ou plusieurs spires se trouvent en court-circuit, elles se comportent comme le secondaire d'un transfor-

mateur. La plaquette de tôle se colle fortement à l'induit à l'endroit où se trouve le faisceau en court-circuit.

Le même phénomène se produit lorsque deux ou plusieurs lames du collecteur sont en court-circuit.

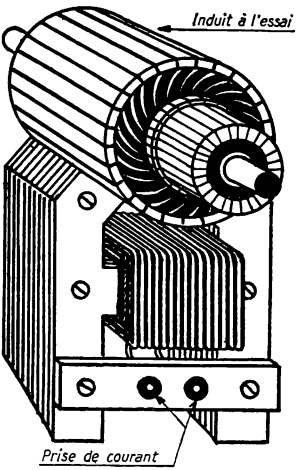


FIG. IX-1.— Électro-aimant appelé « grognard », employé pour la recherche des courts-circuits entre spires, dans les induits.

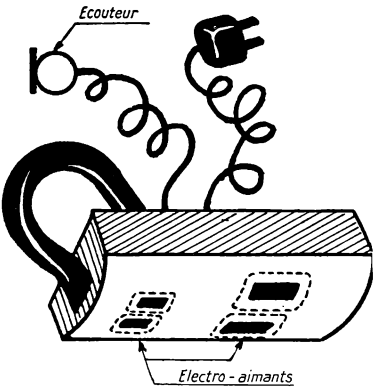


FIG. IX-2. — Appareil destiné à la recherche des courts-circuits entre spires. Il comprend deux électro-aimants; l'un d'eux se relie à une source de courant à fréquence musicale; le bobinage du second est branché à un écouteur qui révèle, par un ronflement, l'endroit du court-circuit.

2° Au moyen d'un écouteur téléphonique (*fig. IX-2*). — Ce procédé consiste à utiliser deux électro-aimants logés dans un support non magnétique. Le premier électro est alimenté par une source de courant alternatif à fréquence musicale de 500 à 800 Hz.

L'enroulement du second électro-aimant est relié à un écouteur téléphonique.

Pour vérifier un bobinage, il suffit de brancher l'électro principal sur une source de courant d'environ 500 Hz et de promener l'appareil de la *figure IX-2* sur l'induit ou dans le stator.

Si une ou plusieurs spires se trouvent en court-circuit, elles deviennent le siège d'un courant induit et provoquent un flux variable qui se communique aux noyaux polaires du petit électro-aimant branché sur l'écouteur téléphonique. Le bobinage enroulé sur les noyaux devient alors le siège d'une tension induite qui se transmet à l'écouteur et engendre dans ce dernier un ronflement caractéristique qui décèle l'endroit du défaut. Il suffit alors de repérer l'encoche où se produit le ronflement et de réparer la section endommagée.

Cet appareil a l'avantage de pouvoir être utilisé indistinctement sur la périphérie des induits et à l'intérieur des stators des moteurs à courant alternatif.

3° Au moyen d'un haut-parleur.

Cet appareil, basé sur le principe précédent, utilise un petit haut-parleur à la place de l'écouteur.

Il comprend deux électro-aimants dont l'un, appelé ***« sonde excitatrice »***, est alimenté par un courant alternatif à fréquence musicale. Le second électro-aimant, appelé ***« sonde exploratrice »***, est accouplé mécaniquement au premier par deux branches en laiton.

Lorsque l'appareil se trouve en face d'un défaut, le courant de court-circuit dans la spire induit une certaine tension dans le bobinage de la sonde exploratrice. Il suffit alors d'amplifier la tension induite et d'envoyer le courant obtenu dans un haut-parleur qui fera entendre un bruitage particulier.

Cet appareil porte le nom d' « audiotest ». Il permet de déceler rapidement les défauts dans tous les types de machines. ***Pour les bobinages à courant continu, il faut dessouder un fil du collecteur pour ouvrir le circuit, car ces bobinages sont fermés sur eux-mêmes.***

Si l'induit comporte plusieurs bobinages en parallèle, il faut dessouder un fil de chaque circuit avant d'effectuer la vérification.

Cet appareil permet également, en ajoutant un voltmètre à la sonde excitatrice, de déceler le mauvais isolement des tôles des rotors et des stators.

4° Au moyen d'un poste d'essai à onde de choc.

Cet appareil, plus perfectionné et plus complexe, permet de déceler l'emplacement des défauts dans un bobinage de machine électrique (*fig. IX-3*). Son prix de revient relativement élevé en limite l'emploi aux établissements construisant des moteurs en grandes séries.

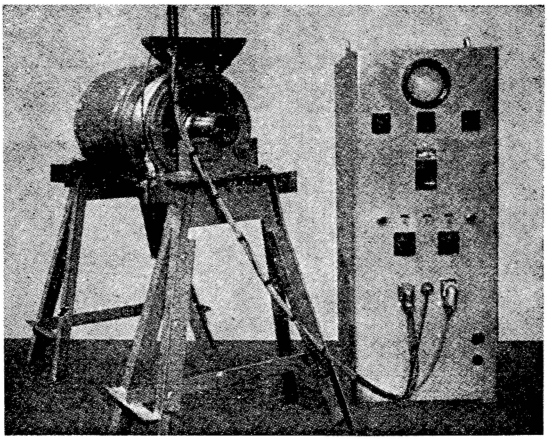


FIG. IX-3. — Poste d'essai à onde de choc pour l'essai des induits des moteurs à courant continu. On remarque, en haut de l'appareil, l'écran cathodique où apparaissent les ondes qui décèlent les défauts possibles dans le bobinage.

La fonction de cet appareil est de produire des impulsions répétées (50 par seconde) qui sont appliquées à la machine en essai. Le défaut est révélé sur un tube cathodique par l'apparition de courbes dyssymétriques (*fig. IX-4*).

Pour procéder aux essais, on applique aux extrémités du bobinage terminé une tension de choc produite par un générateur à récurrence. L'impulsion est obtenue par la décharge d'une capacité à travers un thyratron. Un commutateur inverseur synchrone change la direction de chaque impulsion produite dans l'enroulement.

L'observation à l'oscilloscope cathodique de la forme de l'onde transmise à une des extrémités de phase restée libre permet de juger si le bobinage ne présente pas de

défauts de toute nature : erreurs de connexions, points faibles de l'isolation entre spires, entre bobines ou dans les connexions, etc.

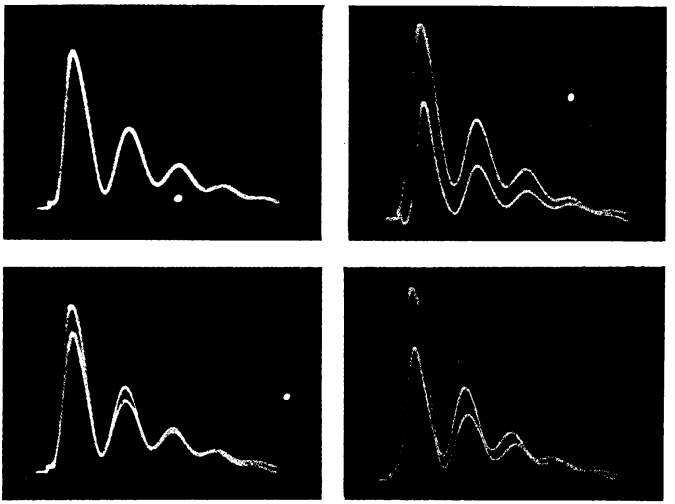


FIG. IX-4. — Essai à l'oscilloscope cathodique des enroulements d'un stator de moteur asynchrone triphasé. Détection des défauts possibles par l'apparition de deux ondes. En haut : à gauche superposition des 2 ondes, aucun défaut, à droite une phase est inversée. En bas: à gauche 1 spire court-circuitée, à droite 10 spires court-circuitées.

2,2. Recherche d'une coupure dans un bobinage

Il est toujours possible de déceler une coupure dans un bobinage. Il suffit pour cela de placer une lampe témoin en série avec l'entrée et la sortie du bobinage. Si le filament rougit, il n'y a pas de coupure. Dans le cas contraire, il y a rupture du circuit. Il peut arriver que le filament ne rougisse pas, si le bobinage a une résistance telle que l'intensité qui passe ne soit pas suffisante pour rendre le filament incandescent.

Ce cas peut se produire avec des bobinages autres que des enroulements de machines électriques tournantes.

Lorsqu'une coupure se produit dans un induit de machine à courant continu, il suffit de dessouder les conducteurs

aboutissant à une lame du collecteur, puis, en utilisant une lampe témoin, de se brancher sur un des conducteurs dessoudés d'une part, et de toucher successivement toutes les lames du collecteur avec l'autre extrémité.

S'il n'y a pas de coupure, la lampe éclaire à chaque contact avec une lame du collecteur. Au contraire, la lampe n'éclairera pas si l'on touche une lame reliée à la section coupée.

Les coupures de bobinage ne se produisent guère que dans les machines de faible puissance. Par contre, tous les types de machines peuvent avoir des coupures provenant de soudures mal faites sur les lames du collecteur.

Ces coupures ne sont généralement pas franches, mais elles sont suffisantes pour nuire au bon fonctionnement de la machine. ***Elles se décèlent difficilement à la lampe témoin,*** car le contact est suffisant pour laisser passer un faible courant qui fait rougir le filament.

Dans ce cas, on emploie un courant plus important réglé par un rhéostat. Des étincelles se produisent alors à l'endroit de la mauvaise soudure et révèlent la panne.

Si ce dernier procédé ne donne pas de résultat, on peut utiliser pour la recherche du mauvais contact un courant de tension très faible, de l'ordre de 2 V par exemple.

En plaçant un ampèremètre en série, on constate que le courant ne passe pas, ou qu'il est notablement inférieur à l'endroit de la panne.

IX,3. IMPRÉGNATION DES BOBINAGES

L'imprégnation des bobinages se fait au moyen de vernis et de compounds appropriés. Elle a pour but de protéger les guipages contre l'humidité et les actions mécaniques extérieures et de favoriser les échanges thermiques.

3,1. Les vernis d'imprégnation

— Leur but est d'augmenter la rigidité diélectrique des bobinages et de compenser les défauts qui peuvent exister dans les isolants.

— Ils doivent être suffisamment souples pour supporter sans se fendiller les variations de dimensions dues aux dilatations des conducteurs et aux efforts mécaniques.

— Leur surface doit être lisse et dure, résistante à l'abrasion, pour assurer une protection efficace contre les particules métalliques et les poussières.

— Ils doivent être suffisamment fluides pour pénétrer dans le bobinage et présenter néanmoins une viscosité suffisante pour ne pas s'égoutter après imprégnation.

3,2. Principaux vernis

On distingue : les vernis d'imprégnation et les vernis de finition. C'est à la commande au fabricant qu'il faut spécifier à quel usage ils sont destinés.

Parmi les vernis isolants, on remarque : les vernis à l'alcool, les vernis phénoliques gras, les vernis glycérophtaliques, les vernis solvants, les vernis spéciaux 155 °C, les vernis silicone 180 °C.

— **Les vernis à l'alcool** sont composés de résines naturelles ou synthétiques additionnées d'un solvant volatil tel que l'alcool à 90°.

— **Les vernis phénoliques gras** sont de deux types : les résines réactives à la chaleur et les résines non réactives, qui ne diffèrent que par le catalyseur employé.

Les résines non réactives sont thermoplastiques ; elles atteignent un stade final de polymérisation lors de leur fabrication.

Les résines réactives ont leur polymérisation arrêtée en cours de fabrication. L'avantage de ces vernis réside dans le fait qu'ils peuvent être polymérisés sous l'action de la chaleur et atteindre rapidement une dureté élevée. Leur résistance à la température est comprise entre 150 et 160 °C.

— **Les compounds,** composés d'asphalte naturel, de paraffine ou de cire. Certains compounds sont à base de résine synthétique, ce sont des vernis solides à la température ordinaire. Ils se ramollissent vers 100 ou 120°C.

— **Les vernis silicones.** La matière de base est le tétrachlorure de silicium, que l'on obtient par réaction

de la silice sur le chlore, en présence de coke à haute température. Ces produits sont solubles à l'état non transformé et susceptibles de donner des vernis. Après évaporation du solvant et durcissement généralement à haute température, ces résines se transforment en un produit dur, infusible, insoluble et incolore. Leur résistance à la chaleur est remarquable. La plupart des produits actuellement sur le marché supportent en service continu des températures de 250 °C.

3,3. Séchage des bobinages

Tout bobinage à imprégner doit être déshydraté, c'est-à-dire séché jusqu'à disparition complète de toute trace d'humidité.

On n'y parvient d'une manière efficace que par le séchage à l'étuve atmosphérique et le séchage sous vide.

Le procédé généralement employé est le séchage à l'étuve atmosphérique, avec renouvellement d'air sec.

Le séchage sous vide est plus rapide et plus rationnel. Il permet d'extraire l'humidité dans les bobinages très épais. Avec ce procédé, les bobinages peuvent être chauffés dans une étuve atmosphérique avant d'être introduits chauds dans l'autoclave.

IX,4. APPLICATION DES VERNIS ISOLANTS

1° Au pinceau ou au pistolet.

Efficacité réduite en raison de la faible pénétration du vernis. Ce procédé n'est guère employé que par les artisans et pour les réparations. Le séchage se fait à l'air, avec exposition au soleil chaque fois que cela est possible.

On utilise également le pinceau pour les bobines inductrices montées sur parties tournantes.

Le bobineur fait une application de vernis à chaque couche de conducteurs. La bobine terminée sera alors polymérisée (cuite) à l'étuve à une température de 130 °C. Cette opération est effectuée lorsque la bobine est montée sur son gabarit d'enroulement.

Après une cuisson de 12 heures environ, la bobine est retirée. Elle se présente alors comme une masse compacte, ce qui est intéressant au point de vue conductibilité thermique.

2° Par immersion ou trempage.

Les bobinages sont séchés à l'étuve atmosphérique à une température de 100 à 120 °C et bien ventilés.

Ensuite, on les plonge encore chauds (80 °C) dans le bain de vernis, où ils resteront immergés jusqu'à la disparition des bulles qui se forment à la surface du bain lorsqu'on y plonge les pièces à traiter.

On les retire ensuite et on les égoutte avant de les repasser à l'étuve, où ils sècheront.

Le trempage des pièces chaudes dans le vernis provoque une évaporation rapide du solvant, ce qui nécessite une surveillance constante du bain. Lorsque le vernis s'épaissit, il y a lieu d'y ajouter le solvant nécessaire.

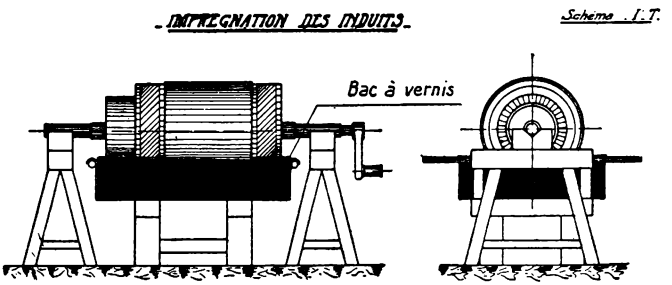


FIG. IX-5. — Procédé simple d'imprégnation par trempage d'un induit. La manivelle fixée en bout d'arbre permet de tourner lentement l'induit afin d'imprégner de vernis tout le bobinage.

L'oxydation de la surface externe des pièces vernies, c'est-à-dire son durcissement, ne doit s'effectuer qu'après l'évaporation des solvants : une oxydation prématurée de la surface arrêtant l'évaporation, la matière d'imprégnation ne serait pas durcie dans sa masse interne.

L'évaporation des solvants peut être faite dans une étuve atmosphérique ventilée.

L'imprégnation par trempage s'effectue dans un récipient aux dimensions des bobinages à tremper, ce récipient étant muni d'un robinet de vidange.

Il existe des installations industrielles parfaitement conditionnées pour ce travail.

Les petits induits peuvent être immergés, mais il n'en est pas de même pour le gros matériel, dont les bobinages doivent être imprégnés avant leur mise en place.

3° Imprégnation sous vide et pression (*fig. IX-6*)

Ce procédé comporte les phases suivantes :

1° Séchage sous vide ou à l'étuve atmosphérique;
2° Imprégnation;
3° Évaporation du solvant;
4° Oxydation.

Ces stades successifs sont obtenus avec une étuve atmosphérique, un autoclave, un réservoir à vernis, une pompe à vide et à pression, un condenseur.

Le séchage des bobinages s'effectue dans des étuves atmosphériques chauffées à 120°C pendant 4 ou 6 h suivant la masse à traiter. Il peut durer 12 h dans certains cas.

L'étuvage a pour but d'éliminer l'humidité contenue dans les bobinages et en particulier dans le guipage. L'imprégnation se fait ensuite dans un autoclave.

Certaines installations comportent essentiellement un autoclave dans lequel s'effectuent successivement le séchage et toutes les opérations de l'imprégnation. Dans ce cas, la cuve est entourée d'un serpentin qui permet le chauffage de l'autoclave soit à la vapeur, soit avec de l'huile chauffée au gaz, au mazout, à l'électricité, soit avec des éléments chauffants électriques.

Les bobinages à traiter sont disposés dans des paniers métalliques ou sur un petit chariot que l'on place dans l'autoclave au moyen d'un petit palan.

On fait le vide jusqu'à 70 cm de mercure et l'on chauffe progressivement pour atteindre une température d'environ 120 °C que l'on maintient durant 4 h.

Le vernis ne devant pas être aspiré sous une température supérieure à 50 °C, ce procédé d'imprégnation nécessite une double enveloppe dans la paroi de l'autoclave afin d'y provoquer une circulation d'eau nécessaire au refroidissement.

On ferme ensuite le robinet de la pompe à vide et on ouvre celui du réservoir à vernis. Ce dernier arrive aspiré par le vide, sous forme de brouillard dans l'autoclave dont

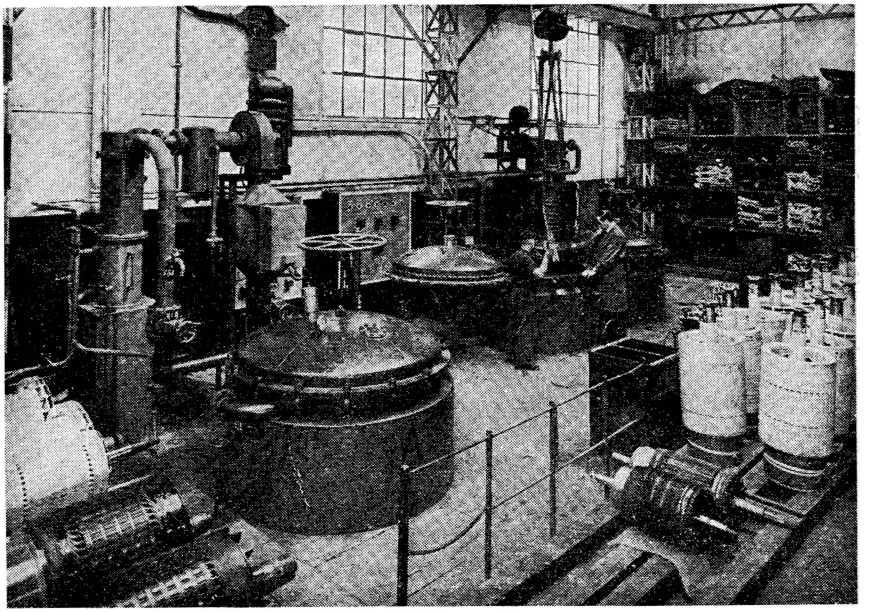


FIG. IX-6. — Photographie d'un stand d'imprégnation sous vide et pression construit par la manufacture MAXEI de Neuilly-sur-Seine.

on ferme le robinet dès que le vernis recouvre de 5 cm les bobinages à imprégner.

On maintient le vide durant 30 mn, puis on applique à l'autoclave une pression de 2 à 3 bars durant 1 h.

Dès que l'on juge l'imprégnation suffisante, on injecte de l'air comprimé qui refoule le vernis dans le réservoir.

On chauffe à nouveau pour évaporer les solvants pendant 1 h ou 2, puis, si l'on désire obtenir le durcissement de la pellicule de vernis, c'est-à-dire l'oxydation, on ventile l'étuve.

Un dispositif de prise d'air frais et d'évacuation correspondante d'air usé permet d'introduire dans l'étuve des quantités croissantes d'air, c'est-à-dire d'oxygène, nécessaires à l'oxydation.

Cette dernière opération peut s'effectuer après évaporation des solvants dans une étuve ordinaire pourvue des dispositifs de ventilation convenables.

4° Imprégnation au compound.

Elle se traite de la même façon, mais celui-ci étant solide à l'état naturel, il faut le chauffer avant de l'injecter dans l'autoclave.

Lorsqu'on traite des bobines au compound, on recouvre celles-ci d'un enrubannage sous lequel on place un fil de cuivre ou de fer, qui sert à couper cette protection lorsque l'opération est terminée.

Cet enrubannage supplémentaire découvre alors un bobinage propre. Les compounds utilisés ont un point de goutte de 100 à 110°C.

La mesure d'un point de goutte consiste à vérifier l'allongement d'une goutte de compound fondant. On note la température lorsque la goutte s'étire à 1 cm de longueur.

Méthode d'imprégnation au compound :

1 — Porter la température du compound à 145 °C.

2 — Porter les éléments du bobinage à imprégner à une température comprise entre 100 et 110 °C (étuve).

3 — Les éléments étant placés dans la cuve, chauffer à 145 °C et faire le vide jusqu'à une dépression de 70 à 72 cm de mercure. En principe, on pousse l'opération jusqu'à disparition de l'eau de condensation.

4 — Faire passer le compound du malaxeur à la cuve d'imprégnation. Rétablir la pression à 7 bars pendant 5 à 12 heures en maintenant le compound à 145 °C.

5 — Evacuer le compound de la cuve et laisser égoutter les éléments.

5° Imprégnation au vernis silicone

On chauffe le bobinage jusqu'à élimination complète de l'humidité, puis on l'imprègne sous vide et pression alors qu'il est encore chaud.

On refoule le vernis et on sèche sous vide à 100°C durant 1 h pour évacuer le solvant, puis on cuit à une température d'environ 200°C pendant quelques heures, selon l'importance de la pièce.

6° Imprégnation des fils émaillés

Les fils émaillés livrés à la consommation sont généralement impropres à l'imprégnation. En effet, l'émail recouvrant les fils doit avoir un allongement égal à celui des fils de cuivre qu'il recouvre. A cause de cette exigence, il ne doit pas être complètement durci lors de l'émaillage du fil.

Il en résulte que l'émail se ramollit à 120°C et se dissout partiellement au contact des solvants.

Lorsqu'on veut imprégner des bobinages en fils émaillés, il est nécessaire de procéder au durcissement de l'émail avant l'imprégnation, afin de le rendre inattaquable par les solvants des vernis.

IX,5. POINT DE GOUTTE D'UN COMPOUND

L'essai pratique de la mesure d'un point de goutte consiste à vérifier l'allongement d'une goutte de compound fondant.

5,1. Méthode opératoire

On chauffe du compound solide de manière à pouvoir y plonger un thermomètre. Ce thermomètre se recouvre, à sa partie inférieure, d'une pellicule de compound de 1 mm d'épaisseur. On laisse refroidir, puis on place le thermomètre dans un tube gradué plein d'huile et on chauffe le tout, comme l'indique la figure.

La température s'élevant ramollit le compound, qui s'étire sous la forme d'une goutte. Lorsque cette goutte atteint le trait inférieur de l'éprouvette, soit 1 cm, on note la température donnée par le thermomètre. On lit, par exemple : 120 °C ; ***c'est le point de goutte du compound.***

5,2. Vérification de la concentration d'un vernis

On pèse 15 à 20 g de vernis dans une capsule tarée.

On porte l'étuve à 110 °C pendant 8 à 10 heures et on pèse de nouveau : la perte du poids est le solvant.

Dans la première pesée, il est nécessaire d'opérer très rapidement, car le solvant s'évapore à l'air libre.

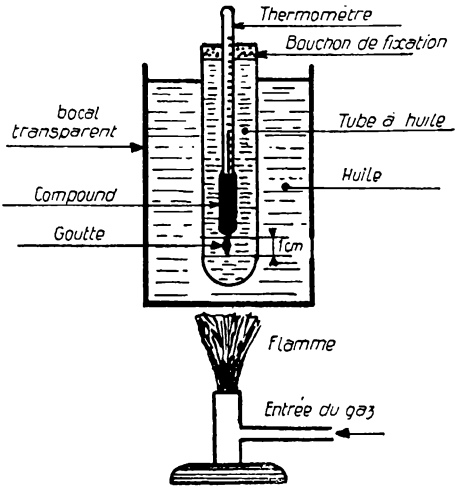


FIG. IX-7. — Essai pratique pour déterminer le point de goutte d'un compound. On remarque, au bas du thermomètre, une goutte de compound qui s'étire sur 1 cm.

IX,6. FORCE ÉLECTRO-MOTRICE DES MACHINES A COURANT CONTINU

6,1. F.E.M. aux extrémités d'un conducteur :

Le flux coupé par un conducteur durant un tour est $2p$.

La durée d'un tour est $\frac{1}{n}$ seconde, d'où :

$$E \text{ moyen } = \frac{2p}{\frac{1}{n}} \text{ volts.}$$

6,2. Induits en quantités (imbriqués) :

Il y a $2p = 2a$ voies d'enroulement ayant chacune $\frac{N}{2p}$ conducteurs en série.

$$E = 2p\, n\, \Phi \times \frac{N}{2p} = N\, n\, \Phi \text{ volts.}$$

6,3. Induits en tension (ondulés) :

Ils comprennent deux voies d'enroulement ayant chacune $\frac{N}{2}$ conducteurs en série.

$$E = 2p\, n\, \Phi \times \frac{N}{2} = p\, N\, n\, \Phi \text{ volts.}$$

6,4. Induits en série-parallèle :

Ils se composent de $2a$ voies d'enroulement comprenant chacune $\frac{N}{2a}$ conducteurs en série.

$$E = 2p\, n\, \Phi \times \frac{N}{2a} = \frac{p}{a}\, N\, n\, \Phi \text{ volts.}$$

Cette dernière formule est générale, elle s'applique à tous les cas.

Pour une machine à 4 pôles en quantité, on a : $p = 2$ et $a = 2$, d'où :

$$E = \frac{2}{2}\, N\, n\, \Phi = N\, n\, \Phi \text{ volts.}$$

Pour une machine à 4 pôles en tension, $p = 2$ et a 1, = soit :

$$E = \frac{2}{1} \times N\, n\, \Phi = 2\, N\, n\, \Phi \text{ volts.}$$

6,5. Symboles utilisés :

p : nombre de paires de pôles, et $2p$: nombre de pôles ;
a : nombre de paires de voies d'enroulement ; $2a$: nombre de voies ;
Φ : flux émis par les pôles, exprimé en webers ;
N : nombre de conducteurs placés sur l'induit ;
n : vitesse de l'induit en tours par seconde.

IX,7. LES PANNES DES MACHINES ÉLECTRIQUES

Elles peuvent avoir deux origines :
— les pannes d'ordre mécanique,
— les pannes d'ordre électrique.

7,1. Les pannes d'ordre mécanique.

Elles sont assez diverses, quoique rares :

— ***échauffement des coussinets,*** provenant d'un manque d'huile, du blocage de la bague de graissage, d'une tension excessive de la courroie, d'un mauvais alignement de l'accouplement;

— ***échauffement des roulements,*** provenant d'un manque de graissage, du mauvais état des roulements, de la tension excessive de la courroie, du mauvais alignement de l'accouplement, d'un jeu interne insuffisant du roulement;

— ***vibrations et bruits divers :*** manque de rigidité du socle, mauvais état des roulements, balourd dans le rotor, frottement rotor contre stator, frottement du ventilateur, corps étranger dans l'entrefer.

7,2. Les pannes d'ordre électrique.

Dérangements possibles dans les génératrices à courant continu.

Constatation	Raisons possibles	Vérification et remède
La dynamo ne s'amorce pas.	Flux rémanent affaibli.	Il faut faire passer un courant continu dans les pôles durant quelques secondes.
	Coupure du circuit inducteur.	Sonner les inducteurs avec une magnéto, ou avec une source de courant séparée.
	Coupure dans le rhéostat d'excitation.	Même procédé que pour le circuit inducteur.
	Mauvais contact à un branchement ou sur une borne.	Vérifier le serrage des bornes disposées sur le circuit inducteur.
	Opposition du flux des pôles au flux rémanent.	Inverser les fils inducteurs sur la plaque à bornes.
	Inversement du courant dans un pôle.	Cette panne peut se manifester lors d'une remise en place d'un pôle réparé. Vérifier la polarité avec une boussole. Elle doit s'inverser vers chaque pôle successif contrôlé.
	Mauvais contact des balais.	Vérifier la pression des balais et leur usure.
	Le collecteur est gras.	Passer le collecteur à la pierre ponce ou au papier de verre fin.
Le débit et la tension ne sont pas normaux.	Une surcharge ou un mauvais calage des balais.	Dans les deux cas on a une baisse de la tension aux bornes de la génératrice, malgré le rhéostat d'excitation.
	Une coupure dans l'induit.	Cela se remarque par des étincelles qui noircissent les deux lames du collecteur reliées à la coupure.

Constation	Raisons possibles	Vérification et remède
	Un court-circuit entre 2 sections de l'induit.	Les spires en court-circuif chauffent et calcinent les isolants. De fortes étincelles apparaissent sous les balais. Un grognard permet de déceler le court-circuit.
Les balais produisent trop d'étincelles.	Court-circuit ou coupure dans le bobinage de l'induit.	Dans les deux cas, le rebobinage partiel ou total est à envisager.
	Collecteur usé, les lamelles de mica émergent.	Faire rectifier au tour le collecteur et gratter les micas en retrait des lames.
	Un mauvais calage des balais, une surcharge.	Rechercher une position des balais qui donne moins d'étincelles.
	Des charbons trop durs ou trop tendres.	Se référer à la notice du constructeur.

Dérangements possibles dans les moteurs à courant continu.

Constation	Raisons possibles	Vérification et remède
Le moteur ne démarre pas.	Pas de tension aux bornes.	Vérifier s'il y a du courant à l'arrivée.
	Fusibles fondus.	Vérifier ceux-ci.
	Coupure dans l'induit.	En déplaçant légèrement l'induit et en remettant le courant, il doit démarrer en produisant de fortes étincelles sous les balais. Bobinage à réparer ou à refaire.
	Coupure ou mauvais contact dans la ligne ou dans l'appareillage, tel que le rhéostat de démarrage.	Vérifier visuellement, ou avec des appareils de contrôle : voltmètre, ohmmètre, etc., les points litigieux.

Constatation	Raisons possibles	Vérification et remède
Le moteur démarre mal.	Mauvais contact à une borne du moteur ou de l'appareillage.	Vérifier le serrage.
	Balais mal calés.	Chercher la bonne position pour un fonctionnement en charge normale.
	Coupure dans l'induit.	Le moteur ne démarre que dans une certaine position. Le défaut est visible sur le collecteur, où deux lames noircissent sous l'effet des étincelles.
	Courroie trop tendue.	Essayer le moteur sans la courroie ou en la détendant.
	Couple résistant élevé au démarrage.	Décharger le moteur au démarrage pour vérification. Le moteur est trop faible ou la machine entraînée a un dérangement.
Le moteur s'emballe.	S'il s'agit d'un moteur série.	Il s'emballe à vide. Il doit toujours être employé en charge.
	Coupure du circuit inducteur dans une excitation dérivée.	Soit dans le rhéostat de champ, soit dans les inducteurs. Vérifier successivement ceux-ci.
	Branchement de l'excitation mal réalisé.	Voir les connexions à la plaque à bornes et les comparer à un schéma.
	Tension d'alimentation trop élevée.	Vérifier sur la plaque à bornes la tension à utiliser.
Les balais produisent trop d'étincelles.	Voir les paragraphes aux dynamos.	Les remèdes sont les mêmes, sauf pour le calage des balais où celui-ci est à l'opposé de la ligne neutre.
Les fusibles fondent.	Le moteur est surchargé.	Vérifier l'intensité au moyen d'un ampèremètre et comparer à l'intensité inscrite sur la plaque du moteur.

Constatation	Raisons possibles	Vérification et remède
	Coupure du circuit d'excitation.	Vérifier avec un ohmmètre, ou simplement si une étincelle de rupture se produit en rompant le contact.
	Court-circuit dans l'installation du moteur.	Brancher un voltmètre à la place d'un fusible et débrancher le moteur à la plaque à bornes. Fermer ensuite l'interrupteur. Si le voltmètre dévie, le court-circuit n'est pas dans le moteur. Vérifier la ligne et l'appareillage.

Les dérangements possibles dans les moteurs à courant alternatif.

Constatation	Raisons possibles	Vérification et remède
Le moteur ne décolle pas, aucun ronflement.	Manque de tension du réseau.	Vérifier la tension avant l'interrupteur avec une lampe témoin ou un voltmètre. S'il y a du courant, vérifier s'il arrive à la plaque à bornes.
	Des fusibles fondus.	Vérifier leur état.
	Une coupure dans la ligne.	Vérifier les bornes, les contacts de l'appareillage et la ligne.
Le moteur ne décolle pas et le ronflement est normal.	Mauvais couplage à la plaque à bornes.	Le stator est couplé en étoile pour une tension d'alimentation en triangle.
	Coupure dans le rotor.	Soudure rompue dans un rotor à cage. Vérifier la tension aux bagues, dans un rotor bobiné. S'il y a une coupure, le voltmètre restera au zéro dans une position.
	Coupure dans le rhéostat.	Vérifier le rhéostat à la lampe témoin.

Constatation	Raisons possibles	Vérification et remède
	Usure ou mauvais contact des balais.	Vérifier l'état et la pression des balais.
	Coupure dans le circuit rotorique.	Vérifier la ligne et le serrage des diverses bornes. Vérifier le rhéostat et les balais.
	Couple résistant trop grand au démarrage.	Décharger le moteur et vérifier son comportement.
Le moteur ne décolle pas et produit un fort ronflement.	Une phase ne reçoit pas de courant.	Vérifier la tension aux bornes du moteur avec un voltmètre ou à la lampe témoin, puis remonter vers la source si la tension n'est pas normale sur une phase. Un fusible peut être fondu. Vérifier le serrage des contacts, des bornes et de l'interrupteur. La ligne peut être coupée.
	Une phase est coupée dans le stator.	Vérifier chaque phase à la lampe témoin après les avoir découplées à la plaque à bornes.
	Un court-circuit dans le stator,	Le bobinage va fumer à l'endroit du court-circuit. Le stator risque de griller. Ne pas insister; couper le courant et réparer localement, si possible, le bobinage.
Le moteur démarre à vide et cale dès qu'on le charge.	Mauvais couplage à la plaques à bornes.	Vérifier le couplage d'après la tension du réseau et l'indication de la plaque.
	Une coupure dans le circuit rotorique bobiné.	Prendre la tension aux bagues. Si elle est nulle, il y a coupure soit aux connexions, soit dans le bobinage.
	Une coupure dans le rhéostat.	Vérifier ce dernier à la lampe témoin.
	Un mauvais contact des balais.	Vérifier leur pression et leur usure.
	Une coupure dans le rotor à cage.	Vérifier les soudures ou les brasures des couronnes.

Constatation	Raisons possibles	Vérification et remède
	Baisse de la tension du réseau.	Vérifier au voltmètre chaque phase.
	Mauvais contact à une borne de la ligne ou de l'appareillage.	Vérifier le serrage de toutes les bornes. Un mauvais blocage offre une résistance au passage du courant.
Le moteur chauffe.	Le moteur est surchargé.	Sa puissance est trop faible en regard de la machine à entraîner. Vérifier avec un wattmètre.
	Le couplage est incorrect.	Vérifier le couplage à la plaque à bornes.
	Court-circuit dans le bobinage statorique ou rotorique.	Mesurer les résistances à l'ohmmètre de chacune des phases. Si le court-circuit est franc, la trace de brûlure est pratiquement invisible.
	Coupure d'une phase.	L'échauffement de l'enroulement de 2 phases seulement indique que la troisième est coupée.

CHAPITRE X

LES MACHINES A COURANT ALTERNATIF

X,1. CLASSEMENT DES MACHINES A COURANT ALTERNATIF

Ces machines se classent en deux catégories :

a) **Machines asynchrones.**

b) **Machines synchrones.**

Les deux types sont réversibles. Elles peuvent être construites sous la forme monophasée (un seul enroulement), diphasée (deux enroulements), ou triphasée (trois enroulements).

Elles sont toutes constituées par une partie fixe appelée « **stator** », qui renferme le bobinage relié au réseau, et une partie mobile désignée sous le nom de « **rotor** ».

Ces machines ne diffèrent que par le rotor, le stator étant réalisé sur les mêmes bases.

1,1. Les machines asynchrones

Elles sont utilisées principalement en moteurs. Branchées sur un réseau, elles peuvent fonctionner en génératrices quand le rotor est entraîné dans le sens du champ tournant à une ***vitesse supérieure à celle du synchronisme.***

L'excitation est fournie dans ce cas par le réseau, qui règle la tension et la fréquence du courant débité.

Ce mode de fonctionnement est couramment employé comme procédé de freinage et de levage.

Le bobinage du rotor d'un moteur asynchrone ordinaire n'est relié à aucune source de courant, ce qui permet de le comparer à un transformateur dont le primaire serait constitué par l'enroulement statorique que l'on relie au réseau, le secondaire étant représenté par le bobinage du rotor.

1,2. Les machines synchrones

Elles sont plus spécialement employées en génératrices, sous le nom d' « alternateurs », et comme moteurs quand on désire une vitesse constante. Ces moteurs sont également utilisés pour l'amélioration du facteur de puissance d'une installation électrique. Il suffit de les surexciter pour qu'ils se comportent comme un condensateur.

Les moteurs synchrones ont une vitesse rigoureusement constante qui dépend du nombre de pôles qu'ils possèdent et de la fréquence du courant auquel ils sont reliés :

$$n = \frac{f}{p} \times 60 = \text{tr/mn.}$$

f, fréquence du courant du réseau (50 hertz).
p, nombre de paires de pôles de l'inducteur (rotor).

Un moteur bipolaire tourne à :

$$n = \frac{f}{p} \times 60 = \frac{50}{1} \times 60 = 3\,000 \text{ tr/mn.}$$

Un moteur à quatre pôles tourne à :

$$\frac{50}{2} \times 60 = 1\,500 \text{ tr/mn.}$$

X,2. ÉTUDE DES ENROULEMENTS A COURANT ALTERNATIF

a) Le bobinage des stators peut être exécuté sous la forme « imbriquée » ou « ondulée ».

Le bobinage imbriqué, que l'on appelle bobinage à « pôles alternés », nécessite une bobine par pôle et par phase, c'est-à-dire autant de bobines que de pôles (*fig.* X-1).

L'enroulement ondulé, désigné sous le nom de bobinage à « pôles conséquents », comporte une bobine par paire de pôles et par phase, soit une bobine pour deux pôles (*fig.* X-2).

b) Un pôle est constitué par une ou plusieurs encoches dont les conducteurs sont parcourus par un courant dirigé dans le même sens.

d) L'indication des pôles N et S sur un schéma d'initiation à l'étude des enroulements pour courant alternatif est symbolique. Elle permet simplement de faire ressortir les lignes neutres et les pôles.

Les schémas d'application ne comportent pas la représentation des pôles. Ceux-ci sont déterminés au moyen de flèches qui indiquent le sens du courant, à un instant donné, dans les conducteurs du bobinage.

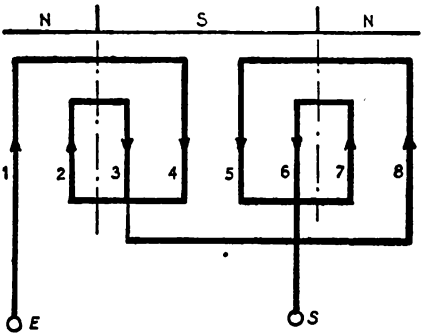


FIG. X-1. — Enroulement de principe d'un stator bipolaire monophasé à pôles alternés (imbriqué), comportant 8 encoches, 1 bobine par pôle. Les flèches donnent le sens du courant dans les faisceaux, ce qui permet de situer les pôles. Les faisceaux 1, 2, 7, 8 forment un pôle *N* et 3, 4, 5, 6 un pôle *S*.

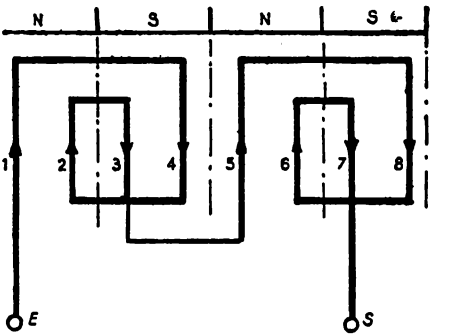


FIG. X-2. — Enroulement de principe d'un stator tétrapolaire monophasé à pôles conséquents (ondulé), comportant 8 encoches, 1 bobine par paire de pôles, 2 encoches par pôle, 2 ondes en série. Les faisceaux 1 et 2 forment un pôle *N*, 3 et 4 un *S*, 5 et 6 un *N*, et 7 et 8 un *S*.

e) ***Dans les machines multipolaires, on groupe les enroulements en « ondes ». On appelle « onde » la partie de l'enroulement soumise à l'influence d'une paire de pôles*** (*fig.* X-3 et X-4).

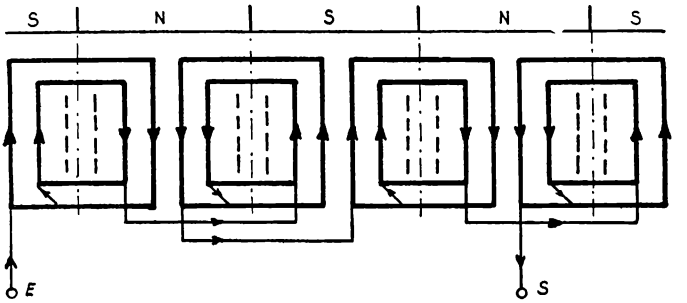


FIG. X-3. — Enroulement d'un stator monophasé à pôles alternés et bobines concentriques comportant 24 encoches, 4 pôles, 2 ondes en série. Les deux tiers seulement des encoches sont bobinées.

Les flèches indiquent le sens du courant dans les bobines à un instant donné, ce qui permet de déterminer le nombre de faisceaux par pôle et le nombre de pôles qui composent le bobinage.

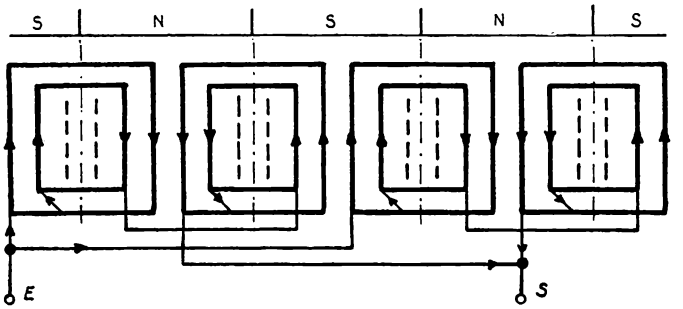


FIG. X-4. — Enroulement d'un stator monophasé à pôles alternés, comportant 4 pôles, 24 encoches, 1 bobine par pôle (imbriqué), 2 ondes en parallèle.

Pour un nombre de spires N, on a une tension $U/2$ et un courant 2 I. Les deux tiers seulement des encoches sont garnis de faisceaux.

Les ondes d'un bobinage peuvent être mises en série, ou groupées en parallèle ou en série-parallèle. On relie les ondes en série si l'on désire obtenir d'un alternateur une tension élevée. C'est le procédé généralement adopté pour les moteurs.

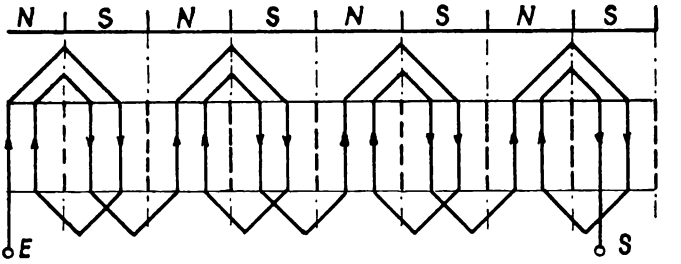


FIG. X-5. — Schéma d'enroulement monophasé ondulé (à pôles conséquents) comportant 24 encoches, dont 16 seulement ont été bobinées, 8 pôles, 4 ondes en série.

d) Pour exécuter un enroulement, il faut déterminer le pas des sections ou des bobines.

On appelle **« pas diamétral »** un pas d'enroulement égal à la longueur du pas polaire. Il équivaut à la distance périphérique comprise entre deux lignes neutres consécutives.

On désigne sous le nom de **« pas raccourci »** un enroulement à pas inférieur au pas diamétral.

Avec un pas d'encoches supérieur au pas diamétral, on a un **« pas allongé ».**

e) Les conducteurs soumis à l'influence d'une paire de pôles occupent 360 degrés électriques (*fig.* X-6).

La distance angulaire électrique d'un pas polaire est 180°, de telle sorte que dans un bobinage triphasé, par exemple, chaque phase occupe q encoches successives sous un angle électrique de 60°.

D'autre part, l'angle α compris entre deux encoches contiguës a pour valeur :

$$\alpha = \frac{60}{q} \text{ degrés électriques.}$$

q, nombre d'encoches par pôle et par phase.

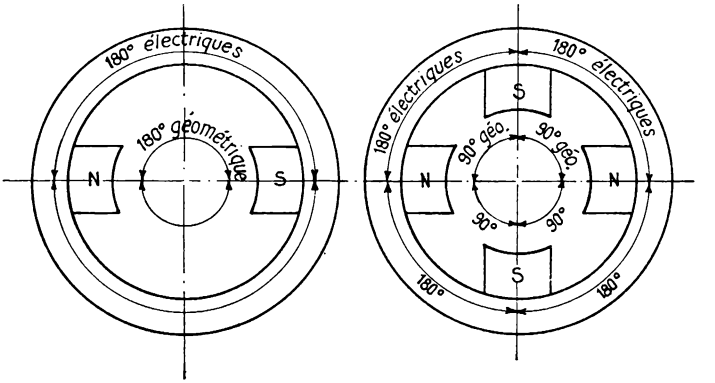


FIG. X-6. — Dans une machine bipolaire, 1 degré géométrique = 1 degré électrique.

Dans une machine à 4 pôles, 1 degré géométrique = 2 degrés électriques.

180 degrés électriques correspondent à l'espace compris entre deux lignes neutres ou entre les axes de 2 pôles consécutifs N et S, quel que soit le nombre de pôles que possède la machine, d'où :

180° électriques = pas polaire;
360° électriques = double pas polaire.

On a choisi une machine à courant continu pour faciliter la démonstration.

f) **Coefficient de bobinage** k_1. Ce coefficient, toujours inférieur à 1, est nécessaire pour le calcul du flux inducteur dans les machines à courant alternatif (Voir chapitre « Alternateurs »).

Il serait égal à 1 si tous les conducteurs d'un pôle étaient logés dans une seule encoche. Il est d'autant plus faible que le nombre d'encoches par pôle et par phase est plus grand.

En pratique, l'enroulement comporte toujours plusieurs encoches par pôle.

C'est dans les moteurs asynchrones monophasés bipolaires que le coefficient de bobinage atteint une valeur minimum (cas où toutes les encoches du stator sont utilisées).

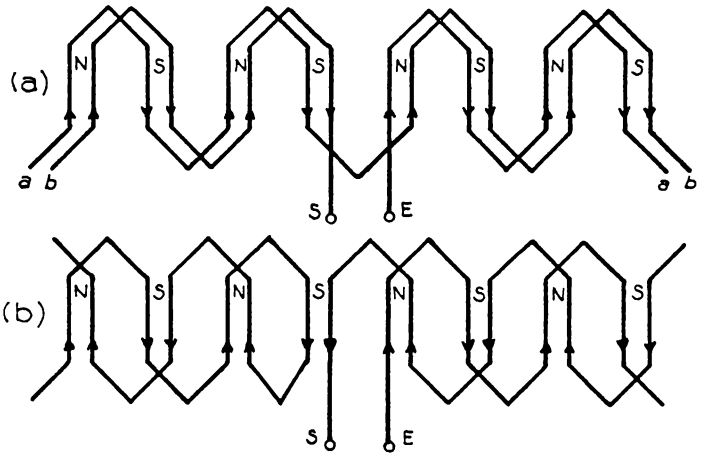


FIG. X-7. — Représentation panoramique du bobinage monophasé d'un stator comportant 8 pôles et 2 encoches par pôle. Le schéma (a) est ondulé progressif ; le schéma (b) est ondulé rétrograde et convient pour les stators à grande puissance qui doivent être montés en deux parties. En suivant le conducteur marqué E, on parcourt la moitié du bobinage dans le sens progressif, puis on rétrograde pour sortir à S.

g) **Le couplage des bobines** et des barres peut s'effectuer sous la forme imbriquée ou ondulée. Dans ce dernier cas, on peut avoir un enroulement ***ondulé progressif,*** ou un enroulement ***ondulé rétrograde.***

Avec l'enroulement ondulé progressif, on parcourt toutes les bobines d'une phase en progressant toujours dans le même sens, ce qui n'est pas le cas avec l'enroulement ondulé rétrograde. En effet, après avoir parcouru une partie de ce bobinage en progressant dans un sens, celui-ci s'inverse pour parcourir la seconde moitié. (Voir *fig.* X-7).

h) ***Un enroulement de machine polyphasée à courant alternatif a autant de circuits distincts qu'il a de phases.***

i) En courant alternatif, les sections prennent le nom de bobines quand il s'agit d'un enroulement à sections concentriques.

j) ***Dans un enroulement polyphasé on a :***

$$q = \frac{N}{2p \times m} \text{ encoches par pôle et phase.}$$

X,3. EXÉCUTION DES SCHÉMAS DE BOBINAGE

a) Les schémas de bobinage des stators de machines à courant alternatif peuvent se faire par ***développement panoramique, ou par projection frontale,*** comme pour la représentation des machines à courant continu.

b) **Pour l'étude des schémas, on peut utiliser les symboles suivants :**

N : nombre d'encoches;
q : nombre d'encoches par pôle et par phase;
m : nombre de phases;
$2p$: nombre de pôles;
p : nombre de paires de pôles;
Y : pas de l'enroulement (nombre d'encoches embrassées par une section);
k_1 : coefficient de bobinage;
k_2 : facteur de raccourcissement.
α : écart angulaire en degrés électriques, entre deux encoches.
Θ : écart angulaire entre phases.

c) **Les schémas de bobinage par développement panoramique** se font au moyen de traits parallèles équidistants, reliés judicieusement entre eux pour former des bobines et un ou plusieurs circuits fermés, selon que les ondes sont groupées en série ou en parallèle.

Les bobinages polyphasés sont exécutés en utilisant une couleur différente pour chaque phase, ou en traçant des

traits forts pour représenter une phase, des traits fins pour la seconde et des traits ponctués pour la troisième (*fig. XII-4* et *XII-5*).

La représentation et la disposition des bobines changent avec le type d'enroulement adopté (bobines concentriques ou enchevêtrées). La disposition diffère également si le bobinage comporte un ou plusieurs faisceaux par encoche.

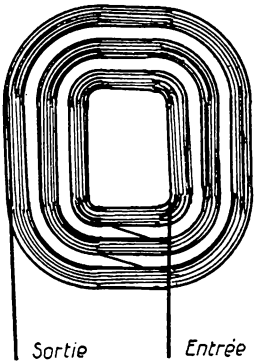


FIG. X-8. — Représentation d'une bobine à trois sections concentriques et six faisceaux. Chaque faisceau est destiné à remplir une encoche. On remarque les deux connexions qui relient les trois sections. La bobine est réalisée sur un gabarit et constituée avec un seul conducteur. Chaque section comprend un nombre de conducteurs suffisant pour remplir deux encoches.

d) **Avant d'exécuter un schéma,** il y a lieu de déterminer le nombre d'encoches successives occupées par pôle et par phase, ce qui permet de connaître le pas des bobines. Les bobinages les plus simples à représenter sont les enroulements à « bobines concentriques » à un faisceau par encoche, dont les schémas ne comportent qu'un trait par encoche, quel que soit le nombre de conducteurs à placer. Ce procédé facilite l'exécution du dessin et sa lecture.

e) **Pour dessiner un bobinage** de machine à courant alternatif, il importe de connaître :

Le nombre d'encoches du stator ou du rotor (N).

Le nombre de pôles ($2p$).

Le nombre de phases (m).

Le nombre de faisceaux par encoche.

f) **Pour calculer le pas polaire d'un bobinage à pas diamétral,** on divise le nombre d'encoches par le nombre de pôles :

$$Y = \frac{N}{2p} \text{ encoches par pôle.}$$

3,1. En prenant pour exemple un stator triphasé de 36 encoches, 4 pôles, on aurait :

$$Y = \frac{N}{2\,p} = \frac{36}{4} = 9 \text{ encoches par pôle;}$$

le pas polaire serait égal à 0 — 9 pour un pas diamétral. Il serait plus grand pour un pas allongé et plus court pour un raccourci.

Le nombre d'encoches par pôle et phase serait de :

$$q = \frac{N}{2\,p \times m} = \frac{36}{4 \times 3} = 3 \text{ encoches}$$

par pôle et par phase, quel que soit le pas Y adopté.

Pour obtenir un pas raccourci, on retranche une encoche au pas diamétral :

$$9 - 1 = 8, \text{ soit un pas de 0 à 8.}$$

Pour avoir un pas allongé, on ajoute une encoche :

$$9 + 1 = 10, \text{ soit un pas de 0 à 10.}$$

Remarques. — Les schémas de bobinage pour machines à courant alternatif qui vont suivre sont exécutés volontairement avec des procédés de représentation variés, ce qui permettra au lecteur de ne pas être dépaysé lorsqu'il se trouvera en face de schémas réalisés de diverses façons, au gré des dessinateurs.

Les connaissances acquises dans les chapitres du bobinage des machines à courant continu faciliteront, dans une certaine mesure, l'étude de l'enroulement des machines à courant alternatif. En effet, un certain nombre de procédés et de termes employés pour la réalisation des bobinages à courant continu se retrouvent dans les chapitres qui suivent.

CHAPITRE XI

LES MOTEURS ASYNCHRONES MONOPHASÉS

XI,1. CONSTITUTION DES MOTEURS ASYNCHRONES MONOPHASÉS

Ces moteurs sont constitués :

1° **Par un stator** composé de disques en tôle poinçonnée pour former une couronne, dans laquelle sont aménagées des encoches pour loger l'enroulement.

2° **Par un rotor** en cage d'écureuil, ou par un rotor bobiné en court-circuit, ou à circuit ouvert.

Les encoches des rotors monophasés sont inclinées par rapport à l'arbre. Cette disposition facilite le démarrage et rend le moteur plus silencieux en marche.

Les moteurs monophasés ont un inconvénient : ils ne peuvent démarrer seuls, il faut les lancer.

A l'arrêt, le champ alternatif produit pouvant être considéré comme la résultante de deux champs égaux tournant en sens inverse à la même vitesse, les conducteurs sont sollicités dans deux sens opposés avec la même force : le moteur ne démarre pas.

On construit cependant des moteurs monophasés qui démarrent d'eux-mêmes, en ajoutant, à l'enroulement principal, un enroulement auxiliaire. Celui-ci est relié en série soit à une résistance, soit à une inductance ou plus généralement à un condensateur, afin d'obtenir un décalage entre les courants des deux enroulements. Le but de ce

dispositif est de créer dans le moteur un champ tournant sensiblement diphasé pour faciliter le démarrage. Dès que le moteur est lancé, on coupe le circuit de la phase auxiliaire et on constate qu'il continue à tourner parce que les tensions induites par le champ qui tourne à l'envers sont à la fréquence 100 Hz et que les courants qui en résultent sont faibles à cause de l'inductance des conducteurs du rotor.

XI,2. RÉALISATION DES SCHÉMAS DE BOBINAGE MONOPHASÉ

A - Cas d'un enroulement monophasé à un faisceau par encoche, bobines concentriques. Les 2/3 des encoches seulement sont bobinés.

Tracé du schéma.

1° On commence par tracer autant de traits parallèles que le stator possède d'encoches.

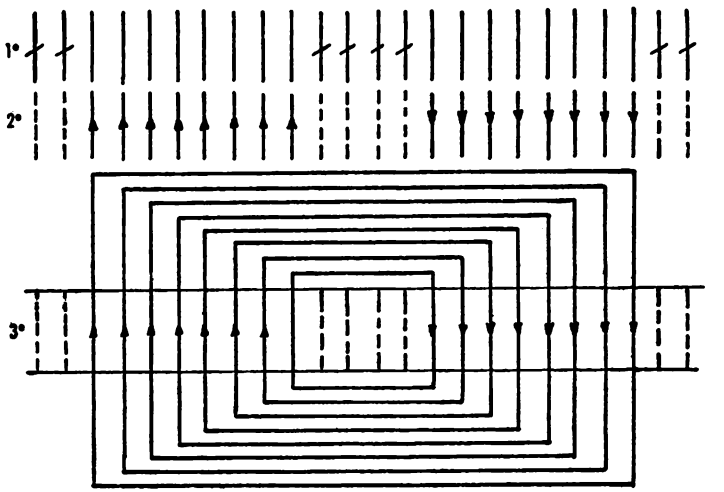


FIG. XI-1. — Tracé en trois opérations du schéma d'un stator monophasé bipolaire à bobine unique.

— Ensuite, sachant que l'enroulement n'occupe que les 2/3 des encoches, on divise les encoches actives (à bobiner) par le nombre de pôles du stator. Ce quotient donne le nombre d'encoches qui seront occupées par un pôle.

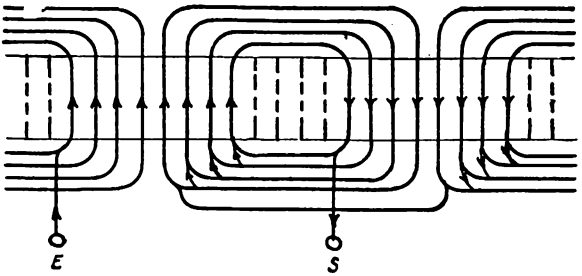


FIG. XI-2. — Schéma par développement panoramique d'un enroulement bipolaire monophasé **à 2 bobines,** exécuté sur un stator de 24 encoches. Seize encoches seulement sont utilisées afin d'améliorer le coefficient de bobinage. Enroulement à bobines concentriques et pôles alternés.

2° Entre chaque pôle, on marque d'un repère un nombre d'encoches égal à la moitié de celles occupées par un pôle. Ce seront les encoches vides.

3° On marque avec des flèches les traits qui formeront les pôles.

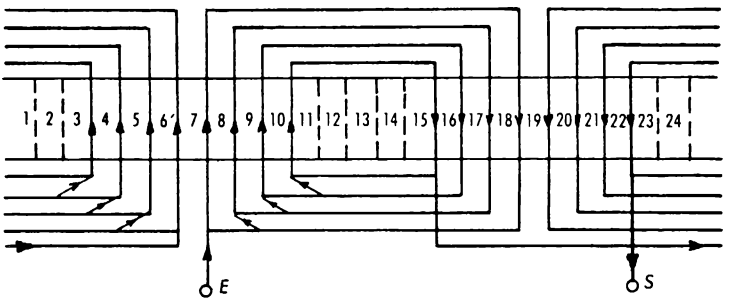


FIG. XI-3. — Variante de la figure XI-2. Stator monophasé bipolaire, 4 encoches, 2/3 des encoches bobinées. La disposition des bobines est la même, mais *E* et *S* sont prises sur des faisceaux différents. Le sens des flèches n'a pas été modifié par ce changement.

4° On forme les bobines en réunissant les faisceaux.

5° L'entrée *E* du pôle sera choisie indifféremment sur un faisceau intérieur ou extérieur à une bobine.

6° Ce dispositif donne une bobine très importante (*fig. XI*-1); on lui préfère l'enroulement à 2 bobines (*fig. XI*-2).

Un troisième procédé permet de réduire encore davantage le développement des bobines : l'utilisation des sections gabariées (*fig.* XI-4).

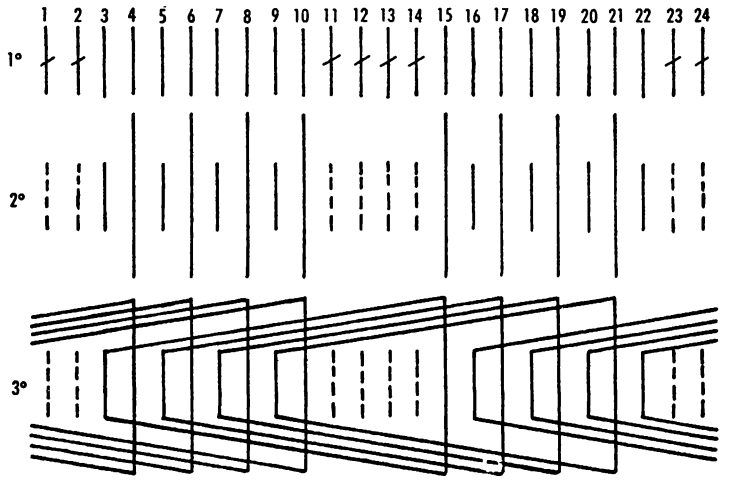


FIG. XI-4. — Tracé en 3 opérations du schéma d'un stator monophasé bipolaire, 1 faisceau par encoche, sections gabariées enchevêtrées, pas des sections 13 (0 à 12). Seize encoches bobinées seulement.

B - Cas d'un bobinage monophasé à un faisceau par encoche avec bobines gabariées, enchevêtrées. Le tiers des encoches reste vide.

Dans ce genre de bobinage, les bobines sont formées et coudées pour pouvoir s'enchevêtrer. Les faisceaux des sections sont de longueurs différentes afin de se coiffer l'un l'autre.

Réalisation du schéma.

1° On trace autant de traits équidistants et parallèles qu'il y a d'encoches et on repère les encoches qui ne recevront pas de faisceau.

2° On place des flèches sur les faisceaux qui devront former les pôles.

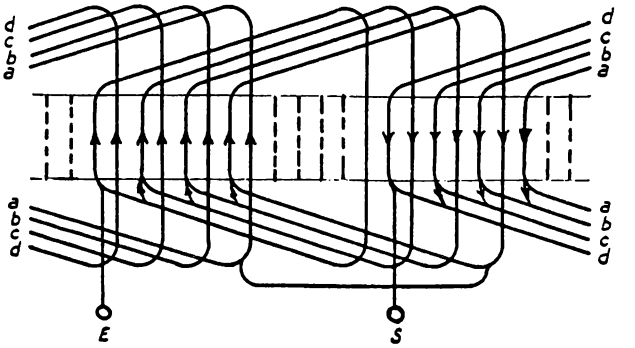


FIG. XI-5. — Schéma d'un enroulement bipolaire monophasé utilisant 16 encoches sur 24 et des bobines identiques gabariées, formant un ensemble enchevêtré.

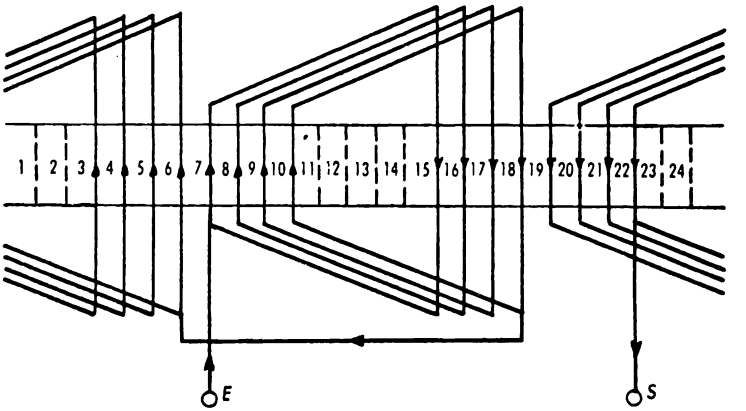


FIG. XI-6. — Stator monophasé, bipolaire, 24 encoches, 16 encoches bobinées, sections gabariées, bobinage enchevêtré, pas des sections 8 (1 à 9).

Un trait sur deux, des encoches actives, est allongé pour former des sections, comme l'indique la *figure XI-4*. (Il faut éviter une erreur facile : d'un pôle à l'autre, la longueur des faisceaux ne change pas).

3° On dessine les sections en tenant compte du pas. (Une bobine est constituée par l'ensemble des sections d'un pôle).

4° L'entrée du bobinage peut se faire sur un faisceau extérieur ou intérieur d'une bobine. Il suffit alors de réaliser un circuit continu qui tienne compte des flèches formant les pôles.

C - Cas d'un bobinage monophasé à 2 faisceaux par encoche avec bobines gabariées.

Dans ce genre de bobinage, les bobines sont formées sur gabarit. L'un des faisceaux de la bobine forme le plan inférieur du bobinage, l'autre le plan supérieur.

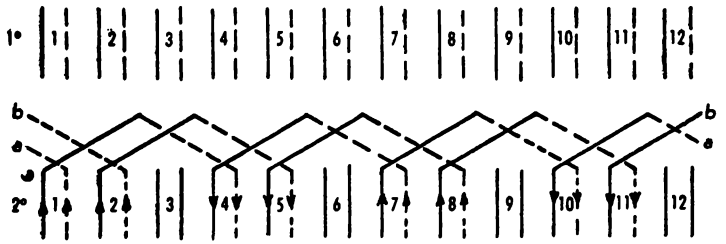


FIG. XI-7. — Tracé en deux opérations du schéma de bobinage d'un stator monophasé de 12 encoches, 4 pôles, 2 faisceaux par encoche. Pour la finition, se reporter à la figure XI-10.

1° Pour établir ce schéma, il faut, comme pour tous les schémas, connaître le nombre d'encoches, le nombre de pôles, le nombre de faisceaux par pôle, le type de bobinage adopté et, dans le cas de bobinage monophasé, le nombre d'encoches occupées.

2° Tracer les faisceaux, à raison de deux par encoche, le faisceau supérieur en trait fort, le faisceau inférieur en traits ponctués. Ce dernier est dessiné à la droite du premier et rapproché de celui-ci pour marquer l'encoche.

3° ***Repérer les encoches qui demeureront vides,*** soit le tiers.

4° ***La fermeture des bobines se dessine*** en tenant compte du pas. Dans la *figure XI-7*, le pas d'encoche est 1 à 4 et le pas des faisceaux 1 à 8, soit 0 à 7.

5° ***On ferme les bobines à leur partie supérieure*** et on place les flèches qui formeront les pôles.

6° ***Les liaisons entre bobines*** se font par des connexions qui bouclent le bobinage, tout en suivant les flèches qui donnent le sens du courant dans les faisceaux, *fig. XI-10*.

2,1. Connexions entre bobines.

Généralités.

Les bobines placées dans les encoches peuvent être reliées soit en série, soit en parallèle, quel que soit le nombre de pôles ; mais c'est le procédé utilisé pour relier les bobines entre elles qui détermine le nombre de pôles du bobinage.

Les *figures XI-8* et *XI-9* comportent chacune deux bobines, mais alors que la *figure XI-8* a deux pôles, la seconde a 4 pôles par le simple changement de l'entrée du courant dans la deuxième bobine.

Pour des raisons traitées dans le chapitre « Les alternateurs », les stators des moteurs monophasés comportent

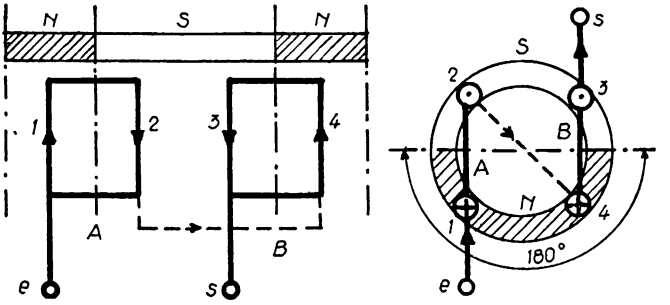


FIG. XI-8. — Les bobines *A* et *B* sont reliées entre elles de telle sorte que deux conducteurs consécutifs soient parcourus par des courants dirigés dans le même sens. Ces deux conducteurs forment un pôle ; soit 1 et 4 (pôle nord) et 2-3 (pôle sud). Chaque pôle occupe 180°.

généralement un tiers des encoches vide lorsqu'ils ne sont pas pourvus d'un bobinage auxiliaire.

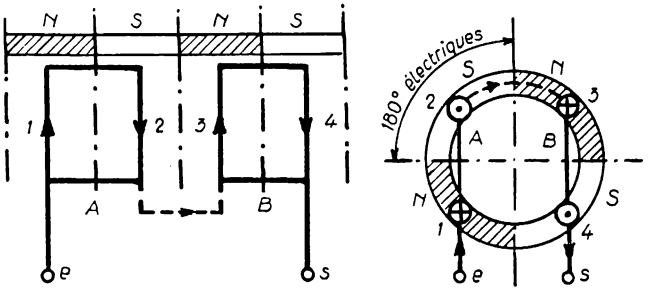


FIG. XI-9. — Les bobines *A* et *B* sont reliées entre elles de telle sorte qu'elles forment 4 pôles. Les quatre conducteurs sont parcourus par un courant dirigé alternativement vers le haut puis vers le bas (figure de gauche) ; le courant pénètre dans le pôle *N* et sort par le pôle *S* dans la figure de droite. Chaque pôle occupe 90° géométriques dans le stator, soit 180° électriques.

Groupement des bobines.

Le bobinage des machines à courant alternatif peut être réalisé soit avec des ***bobines concentriques*** à un faisceau par encoche, soit avec des ***sections enchevêtrées*** à un ou deux faisceaux par encoche.

Les bobines d'un stator peuvent être reliées toutes en série, ou former deux groupes égaux connectés en parallèle. Ce dernier cas est peu fréquent.

Une bobine peut être constituée par 2, 3 ou 4 sections reliées entre elles.

Les faisceaux peuvent être mis en série dans un ordre quelconque, pourvu que le courant qui les parcourt soit dirigé dans le sens convenable.

XI,3. BOBINAGE DES STATORS DE MOTEURS ASYNCHRONES MONOPHASÉS

L'enroulement du stator de ces moteurs peut être réalisé par les procédés suivants :

a) Exécuter un enroulement monophasé comportant une entrée et une sortie, en utilisant les deux tiers seulement des encoches. (Voir les figures concernant ce sujet).

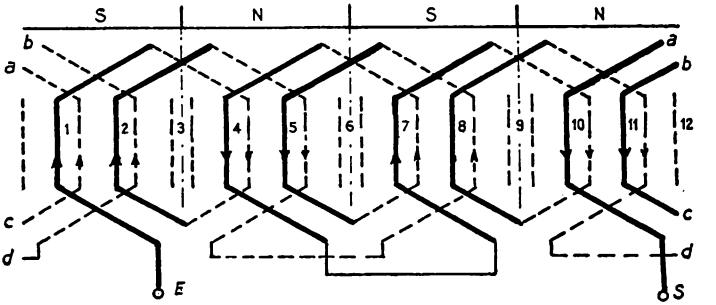


FIG. XI-10. — Enroulement *ondulé progressif* d'un stator monophasé 12 encoches, dont 8 bobinées, 4 pôles, 2 faisceaux par encoche. On remarque, en partant de *E*, que le courant a le même sens dans les encoches 1 et 2 qui forment un pôle sud. Dans les encoches 4 et 5, le courant est inversé; on a un pôle de nom contraire, etc...

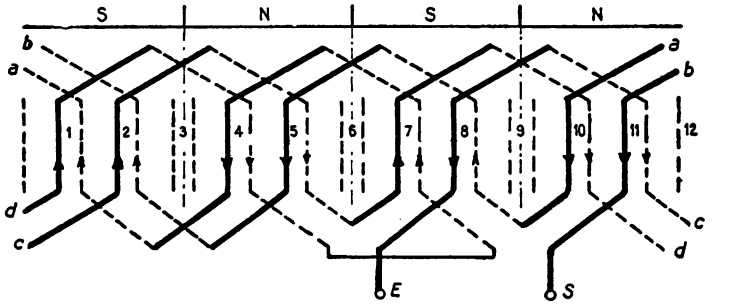


FIG. XI-11. — Variante de la figure précédente avec un enroulement *ondulé rétrograde*. Le stator comporte 12 encoches, 4 pôles et 2 faisceaux par encoche. Le tiers des encoches demeure vide. La progression a son sens inversé après avoir parcouru la moitié des faisceaux.

b) Réaliser un enroulement comportant une phase principale et une phase auxiliaire.

c) Utiliser l'enroulement d'un stator triphasé de moteur asynchrone en reliant deux phases en série pour former l'enroulement principal, la troisième servant d'enroulement auxiliaire.

XI,4. ENROULEMENT A PHASE AUXILIAIRE

L'entrée de l'enroulement auxiliaire est décalée de 90° électriques par rapport à celle de la phase principale, comme s'il s'agissait d'un stator de moteur diphasé.

Les conducteurs de l'enroulement auxiliaire se placent dans les encoches inutilisées et s'étendent souvent à des encoches où sont déjà logés des conducteurs appartenant à l'enroulement principal. Celui-ci n'utilise que les deux tiers des encoches dans la plupart des cas.

Pour permettre le fonctionnement de ces moteurs sous deux tensions, on bobine des stators, dont la phase principale comporte deux enroulements qui peuvent se coupler en tension sous 380 V et en parallèle sous 220 V par exemple.

La phase auxiliaire, calculée pour fonctionner sous 220 V dans les deux cas, est branchée aux extrémités d'une bobine de la phase principale. (Voir la figure dans le tome II, chapitre des moteurs monophasés).

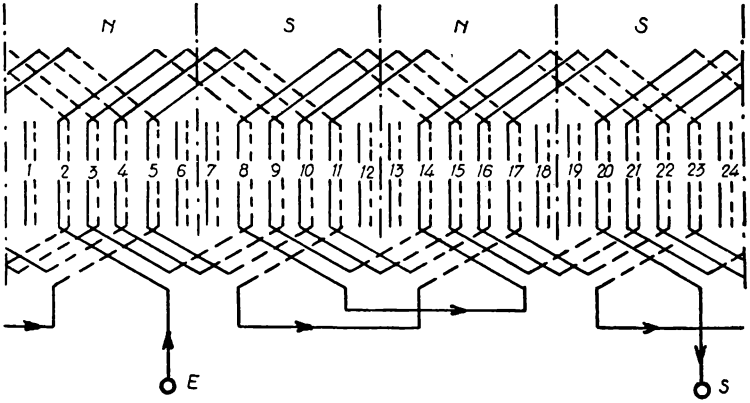


FIG. XI-12. — Schéma de bobinage d'un stator monophasé, comportant 24 encoches, 2 faisceaux par encoche, 2 ondes en série, enroulement imbriqué, 16 encoches bobinées, 8 encoches vides.

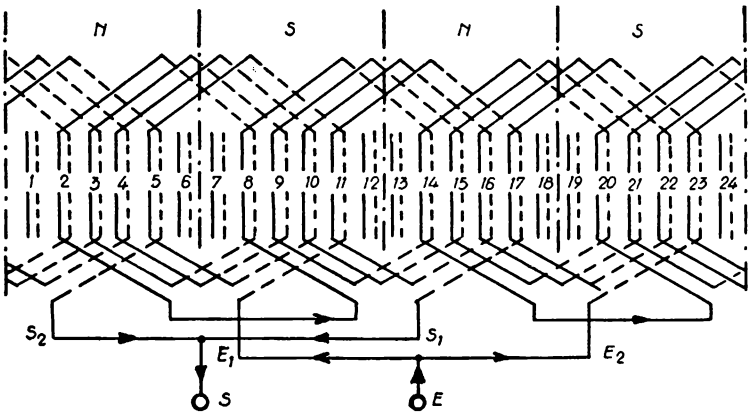


FIG. XI-13. — Schéma de bobinage d'un stator monophasé comportant 24 encoches, 2 faisceaux par encoche, 2 ondes en parallèle, enroulement imbriqué, 16 encoches bobinées. Ce stator absorbe une intensité double de celle du stator de la figure précédente, mais sous une tension de moitié inférieure.

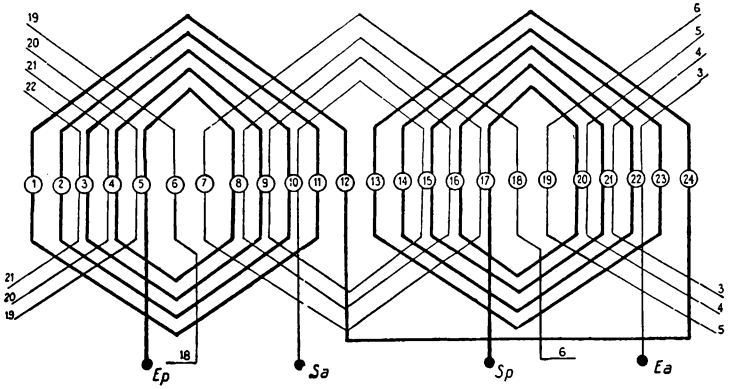


FIG. XI-14. — Schéma de bobinage concentrique d'un stator monophasé bipolaire, 24 encoches, avec enroulement auxiliaire. L'enroulement principal utilise 20 encoches, l'enroulement auxiliaire 16, dont 12 communes avec l'enroulement principal. Les extrémités de la phase auxiliaire sont branchées à un coupleur qui les relie à un condensateur.

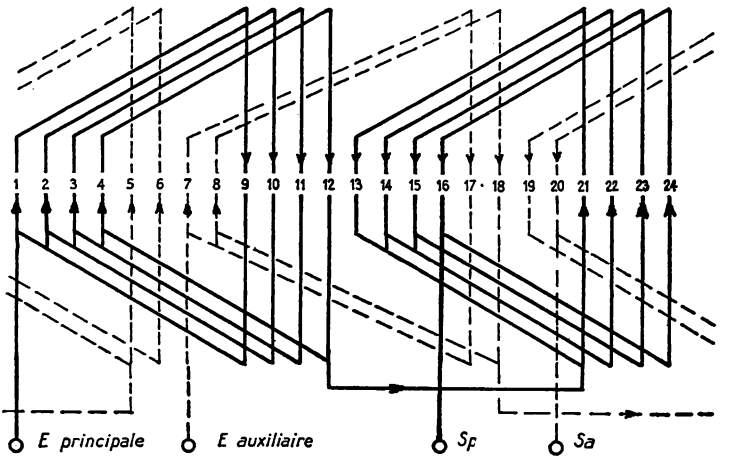


FIG. XI-15. — Enroulement d'un stator de moteur asynchrone monophasé à phase auxiliaire, comportant 24 encoches, 2 pôles. La phase principale occupe les deux tiers des rainures avec un pas d'encoches de 1 à 9. La phase auxiliaire utilise les encoches libres avec un pas de 1 à 11. L'entrée de la phase auxiliaire est décalée de 90° électriques par rapport à l'entrée principale.

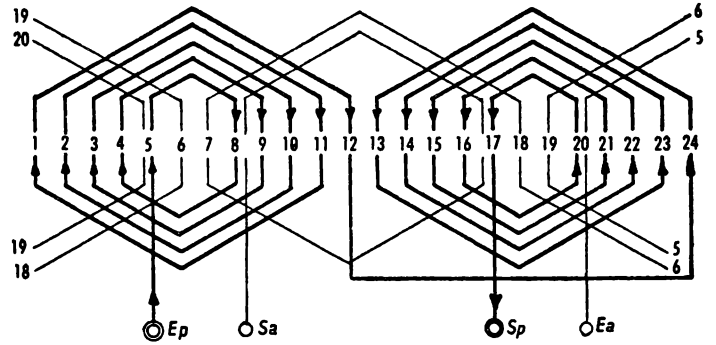


FIG. XI-16. — Schéma d'un bobinage bipolaire monophasé, avec enroulement auxiliaire. Stator de 24 encoches. L'enroulement principal occupe 20 encoches, l'enroulement auxiliaire 8, dont 4 communes avec l'enroulement principal.

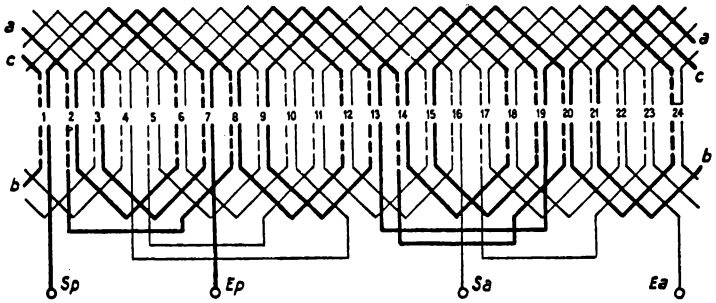


FIG. XI-17 — Schéma d'enroulement d'un stator de moteur asynchrone monophasé, 4 pôles, 24 encoches, $k_1 = 0{,}879$.

Le bobinage est à pôles alternés, du type rétrograde, à 2 faisceaux par encoche.

L'enroulement principal comporte 12 sections, qui occupent 16 encoches, dont 8 en commun avec les faisceaux de la phase auxiliaire.

L'enroulement auxiliaire est constitué également par 12 sections, qui occupent 16 encoches, dont 8 en commun avec la phase principale.

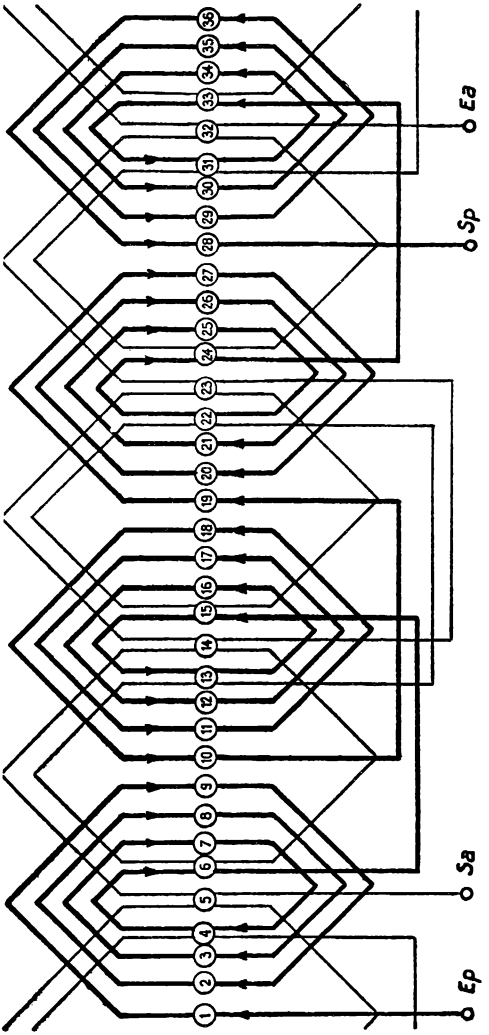


FIG. XI-18. — Schéma de bobinage du stator d'un moteur asynchrone monophasé à condensateur, à pôles alternés. Le stator comporte 36 encoches, 4 pôles.

La phase principale est en trait fort et occupe 32 encoches.

La phase auxiliaire qui se raccorde au condensateur est en trait fin et comporte 4 faisceaux par pôle, répartis dans 3 encoches, dont 2 communes à la phase principale.

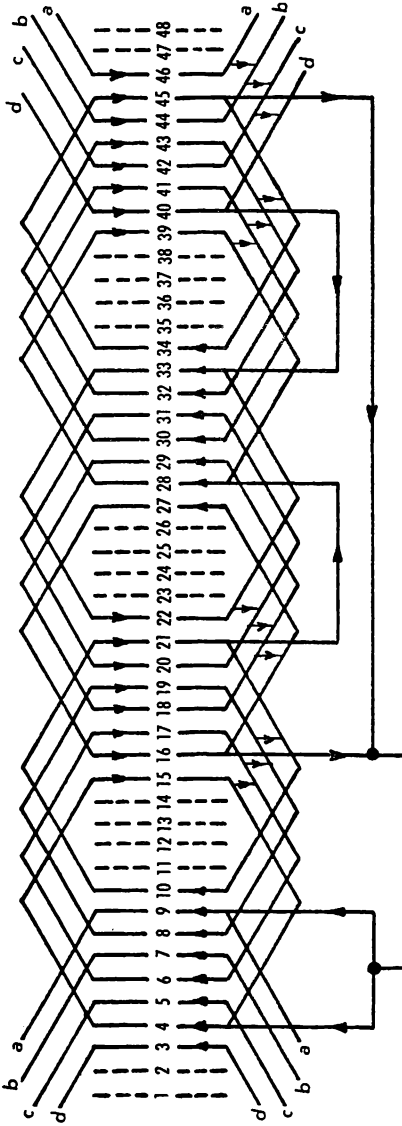


FIG. XI-19. — Schéma de bobinage d'un moteur asynchrone monophasé, à pôles conséquents (ondulés). Le stator possède 48 encoches, dont 32 bobinées seulement formant 4 pôles. L'enroulement est constitué par deux parties parallèles.

CHAPITRE XII

LES MOTEURS ASYNCHRONES POLYPHASÉS

XII,1. GÉNÉRALITÉS

D'une conception identique aux moteurs monophasés, le stator est composé d'une carcasse en tôle soudée, qui renferme des disques de tôle empilés et préalablement poinçonnés pour former des encoches dans lesquelles sera logé l'enroulement.

L'isolement des tôles est rendu nécessaire par la formation de courants induits qui prennent naissance dans toute masse conductrice soumise à une induction variable. Ces courants, appelés « courants de Foucault », transforment de l'énergie en chaleur. Cet isolement est réalisé soit par un vernis, soit par oxydation de la surface des tôles, obtenue en partie au moyen d'un recuit. Ce dernier procédé n'est utilisé que pour des moteurs de faible puissance.

Le rotor est constitué par un tambour en tôles isolées et poinçonnées afin de former des encoches qui serviront à loger le bobinage.

L'enroulement du stator seul est branché sur le réseau; le bobinage du rotor n'est relié à aucune source de courant, ce qui permet de comparer ce moteur à un transformateur dont le primaire serait constitué par l'enroulement du stator, le bobinage du rotor tenant lieu de secondaire. Toutefois, le champ n'est pas simplement pulsatoire comme dans un transformateur ordinaire, il a un mouvement circulaire qui entraîne le rotor.

Les moteurs polyphasés démarrent seuls sans aucun artifice. On les bobine sous la forme diphasée avec deux enroulements, et plus généralement sous la forme triphasée avec trois enroulements monophasés.

Le bobinage des stators polyphasés doit comprendre un nombre identique de conducteurs par phase ; de plus, il convient qu'en deux points diamétralement opposés de l'entrefer, on trouve toujours la même phase.

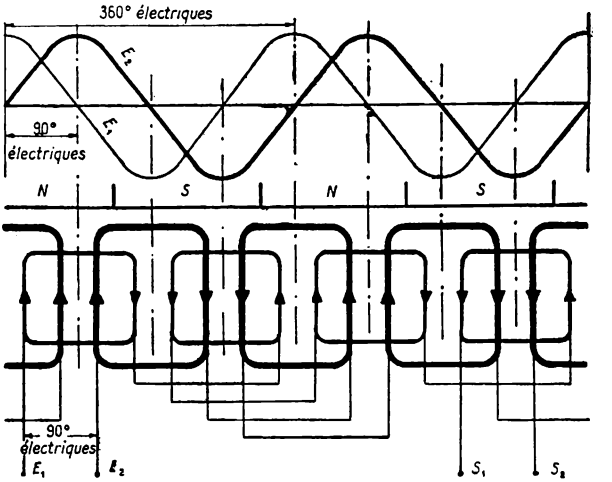


FIG. XII-1. — A l'instant considéré sur le schéma, on remarque au départ que E_1 se trouve en position maximum, alors que E_2 est au point zéro. Un quart de période plus tard, les positions sont inversées. Le schéma représente un enroulement diphasé à bobines concentriques disposées sur 2 plans, d'un stator 4 pôles, 16 encoches, 1 bobine par pôle et par phase (imbriqué), 2 ondes en série.

E_1 est séparée de E_2 du quart de la distance qui sépare 2 pôles de même nom, soit de 90° électriques. Le pas des bobines est déterminé par le nombre d'encoches par pôle et par phase. Il est égal à 4 dans le cas présent, ce qui oblige à laisser libres 2 encoches pour la phase suivante.

XII,2. CONSIDÉRATIONS SUR LES STATORS DES MOTEURS ASYNCHRONES TRIPHASÉS

Les réseaux diphasés étant en voie de disparition, nous traiteront plus particulièrement les bobinages concernant les machines à courant alternatif triphasé.

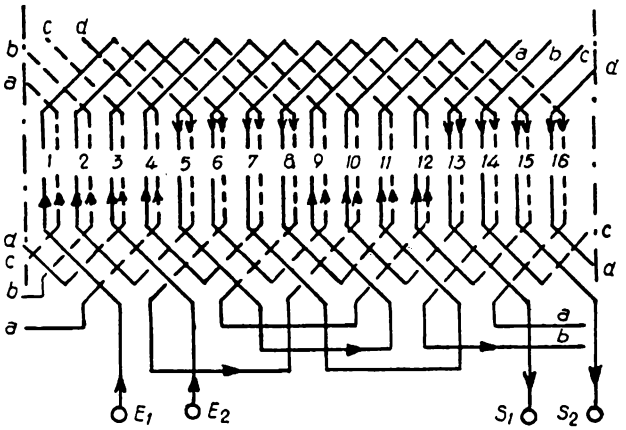


FIG. XII-2. — Schéma de bobinage d'un stator diphasé comportant 16 encoches, 2 faisceaux par encoche, enroulement imbriqué à 4 pôles, 2 ondes en série. Les entrées E_1 et E_2 sont à 90° électriques l'une de l'autre.

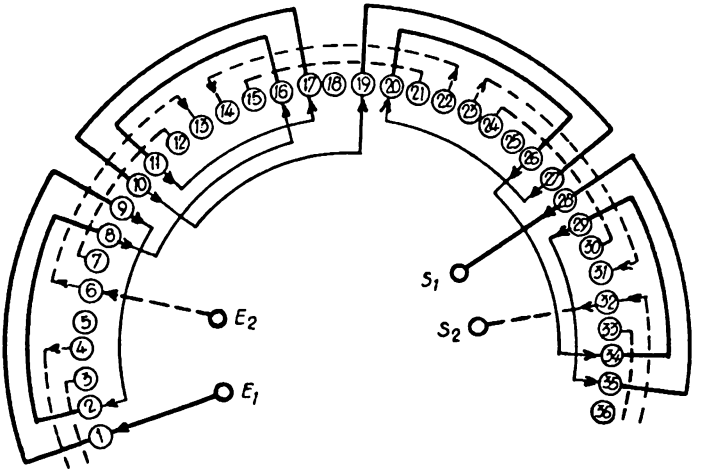


FIG. XII-3. — Schéma d'enroulement d'un stator diphasé 4 pôles, 36 encoches dont 4 demeurent vides. Ce bobinage a été exécuté sur un stator primitivement triphasé. Seule la phase 1 est connectée. Le lecteur peut s'exercer à relier les bobines de la phase 2 en respectant le sens des flèches et en opérant comme il a été fait pour la phase 1. Les encoches 5-18-36 sont vides.

Avec un stator de 72 encoches, on peut réaliser un 8 pôles, 64 encoches, en laissant vides les encoches : 5-18-23-36-41-54-59-72.

Pour un 12 pôles, 108 encoches, on a 12 encoches vides : 5-18-23-36-41-54-59-72-77-90-95-108.

Les stators des moteurs à basse tension (110 à 500 V) et de faible et moyenne puissance ont des encoches semi-fermées. L'enroulement comporte un ou deux faisceaux par encoche.

A partir de 150 kW, les enroulements sont à barres massives ou subdivisées, à deux faisceaux par encoche.

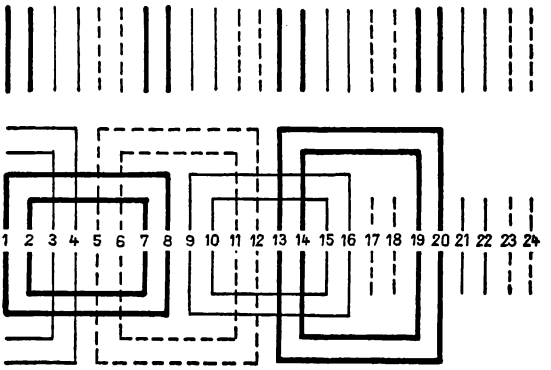


FIG. XII-4. — Mode de représentation par développement panoramique d'un enroulement à bobines *concentriques* d'un stator triphasé comportant 24 encoches, 2 encoches par pôle et par phase, 1 faisceau par encoche.

1° On trace 24 traits en alternant ceux-ci par des représentations variées qui permettent de différencier chaque phase.

2° On groupe les traits pour en faire des bobines courtes et des bobines longues. Les connexions entre bobines seront étudiées plus loin.

Les stators des moteurs à haute tension (3 000 à 15 000 V) sont généralement à encoches ouvertes. L'enroulement comporte des bobines gabariées sur forme, à raison de deux faisceaux par encoche.

Un enroulement de moteur asynchrone triphasé est constitué par trois enroulements monophasés décalés l'un par rapport à l'autre de 120° électriques.

XII,3. ENROULEMENT A UN FAISCEAU PAR ENCOCHE

Généralités.

Quand le bobinage d'un stator comporte un faisceau par encoche, l'enroulement est constitué soit par des bobines concentriques disposées sur deux ou trois plans de part et d'autre des tôles du stator, soit par des bobines gabariées qui donnent un bobinage enchevêtré (*fig. XII-5*).

L'enroulement à bobines concentriques.

Il s'effectue au moyen de bobines gabariées sur une forme. Les conducteurs s'égrènent un à un dans les encoches.

Le bobinage par fils passés.

On utilise également, mais de plus en plus rarement, le bobinage par fils passés. Ce procédé consiste à enrouler

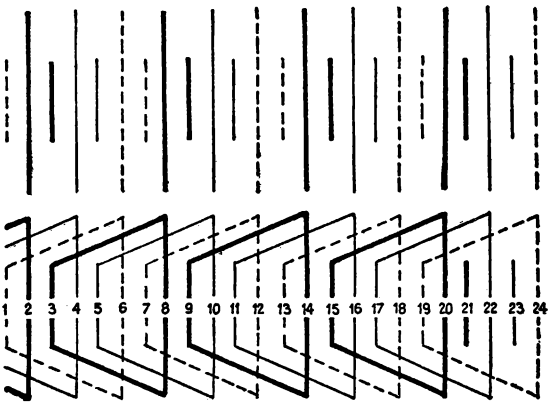


FIG. XII-5. — Mode de représentation par développement panoramique d'un enroulement triphasé à bobines égales *enchevêtrées*. Les bobines sont dessinées en traçant alternativement un trait court et un trait long que l'on relie au pas de l'enroulement comme suit :

La figure comprend 24 encoches, soit 24 : 3 = 8 encoches par phase. En admettant 4 pôles au stator, cela donne 2 encoches par pôle et par phase et le pas des bobines est de 0 à 5. En effet, chaque bobine devra englober 2 faisceaux de chacune des autres phases, soit 4 faisceaux.

à la main le fil pris directement sur le rouleau. Des cales en bois fixées de part et d'autre du stator permettent de mouler les divers plans des têtes de bobines à la sortie des encoches (*fig. XIII-6*).

L'enroulement à bobines gabariées.

Quand l'enroulement s'effectue au moyen de bobines gabariées, celles-ci peuvent être placées séparément ou groupées par phase. Dans ce dernier cas, on supprime les soudures entre bobines dans chaque phase, mais la mise en place nécessite une attention soutenue du bobineur, qui doit veiller à relier les sections de chaque phase dans l'ordre convenable.

Dans le premier cas, toutes les sections se placent sans tenir compte des phases. Celles-ci sont formées ensuite en soudant les extrémités des sections de façon à obtenir trois bobinages distincts, décalés du tiers de l'arc qui sépare deux pôles consécutifs de même nom.

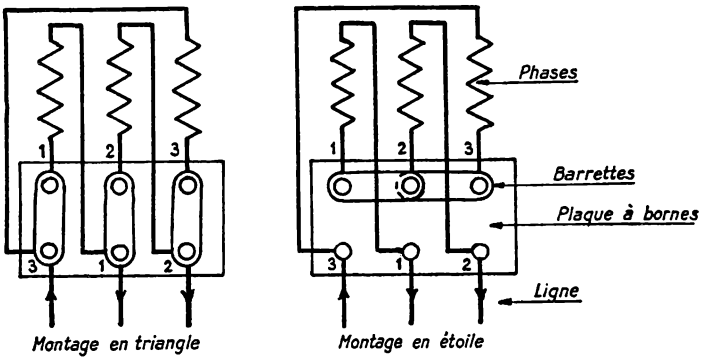


FIG. XII-6. — Le raccordement des extrémités des phases d'un enroulement de machine polyphasée se fait sur une plaque à bornes, qui comporte autant de bornes qu'il y a d'entrées et de sorties dans le bobinage, soit six pour un stator triphasé.

En consultant la figure, on remarque que l'entrée et la sortie de chacune des phases n'aboutissent pas à deux bornes placées face à face, car avec le montage en triangle, les trois phases se trouveraient isolées les unes des autres. La plaque à bornes permet, en outre, d'effectuer, au moyen des barrettes, soit un couplage étoile, soit un couplage triangle, ce qui donne la possibilité d'utiliser le moteur sous deux tensions différentes. Dans les deux cas le courant entre par une borne et ressort par les deux autres.

Les extrémités des trois enroulements sont reliés ensuite à une plaque à bornes, de telle sorte que l'entrée et la sortie de chaque phase ne se trouvent pas en regard. En effet, avec un couplage en triangle, les trois phases seraient isolées l'une de l'autre (*fig. XII*-6).

XII,4. PAS DES BOBINES DANS LES ENCOCHES

Dans un enroulement triphasé, le pas des sections ou des bobines est donné par le nombre d'encoches par pôle et par phase et par le pas adopté : diamétral, raccourci ou allongé.

Dans un enroulement triphasé à deux encoches par pôle et par phase, la plus petite bobine doit embrasser quatre encoches s'il s'agit d'un enroulement avec bobines concentriques.

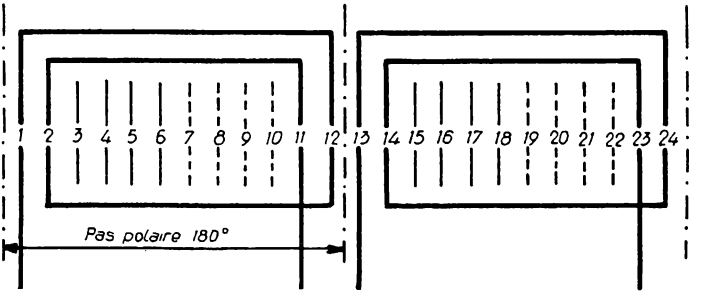


FIG. XII-7. — Recherche du pas des bobines dans un stator triphasé comportant 24 encoches, 2 pôles. Le pas polaire est de 24/2 = 12 encoches. Il se situe dans l'axe de deux pôles consécutifs. Les faisceaux composant le pôle d'une phase doivent se répartir de part et d'autre de l'axe des pôles. Une seule phase est représentée.

Exemple : Un stator triphasé, 24 encoches, 2 pôles, enroulement à bobines concentriques (*fig. XII*-7 et *XII*-8).

Avant de dessiner un schéma de bobinage, on commence par chercher quel en sera le nombre d'encoches par pôle et par phase, soit :

$$q = \frac{24}{3 \times 2} = 4 \text{ encoches par pôle et par phase.}$$

Chaque phase devra occuper, dans un enroulement triphasé bipolaire comprenant 24 encoches :

$$\frac{24}{3} = 8 \text{ encoches.}$$

En faisant une seule bobine avec 4 sections concentriques, on obtiendrait le résultat recherché ; mais cette solution donnerait des têtes de bobines beaucoup trop volumineuses. On préfère utiliser, pour chaque phase, deux bobines de deux sections chacune.

Pour commencer le schéma, on trace 24 traits équidistants et parallèles.

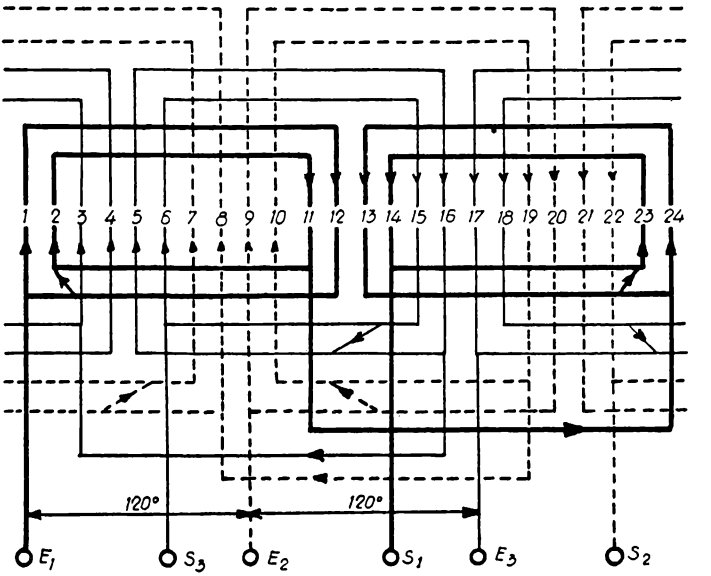


FIG. XII-8. — Schéma complété de la figure précédente. L'entrée de la deuxième phase est décalée de 120°, soit : $\frac{2\pi}{3} = \frac{24}{3} = 8$ encoches. La troisième phase est également décalée de 120°, soit de 8 encoches après l'entrée de la phase 2.

Les bobines des 3 phases occupent successivement les encoches suivantes :

Phase I	Phase II	Phase III
A → 1-2 et 11-12	9-10 et 19-20	17-18 et 3- 4
B → 13-14 et 23-24	21-22 et 7- 8	5 -6 et 15-16

12 traits représenteront les 12 encoches successives d'un pôle ; les 12 autres formeront le second pôle.

Chaque côté de bobine occupe 2 encoches et si la phase 1 commence à l'encoche 1, la première bobine comprendra les encoches 1-12-et 2-11, car, entre les traits 2 et 11, il faut dégager 8 encoches qui serviront à placer les phases 2 et 3, dont chaque pôle occupe 4 traits (*fig. XII-7*).

Chaque pôle par phase comprendra 4 encoches consécutives. La phase 1 sera complétée par une deuxième bobine placée dans les encoches 13-14 et 23-24. Il suffit alors de relier les traits 13-24 et 14-23 pour former la deuxième bobine, ce qui nous donne 2 pôles de 4 encoches chacun (*fig. XII-8*).

L'entrée de la deuxième phase doit se trouver à 120° électriques, d'où :

$\frac{24}{3} = 8$ encoches au-delà de l'encoche 1, soit à l'encoche 9.

Il suffit maintenant de placer la première bobine de la phase 2 dans les encoches 9-20 et 10-19, car ici également le centre de la bobine doit laisser 8 encoches inoccupées.

La deuxième bobine se place comme il a été fait pour la première phase, en accolant une deuxième bobine à la première.

L'entrée de la troisième phase doit être à 120° électriques de celle de la phase 2, soit à l'encoche $9 + 8 = 17$.

De l'encoche 17 part la première bobine avec le même processus employé pour la phase 1 (voir *fig. XII-8*).

L'enroulement se fait sur trois plans : la deuxième phase coiffe la première et la troisième enrobe la deuxième.

Deuxième exemple : Un stator triphasé, 24 encoches, 4 pôles, enroulement à bobines concentriques, 2 ondes en série.

$$\text{Pas polaire} = \frac{\text{Nombre d'encoches}}{\text{Nombre de pôles}} = \frac{24}{4} = 6 \text{ encoches.}$$

Nombre d'encoches par phase =

$$\frac{\text{Nombre d'encoches}}{\text{Nombre de phases}} = \frac{24}{3} = 8.$$

Nombre d'encoches par pôle et par phase : $\frac{24}{4 \times 3} = 2$.

Ce dernier résultat fait ressortir que les bobines doivent comporter deux sections concentriques qui formeront 2 pôles. Comme nous avons 4 pôles, il faudra 2 bobines à deux sections, d'où le tableau suivant qui concerne la *figure XII*-13.

Phase 1	Première bobine, encoches : 1- 2 et 7- 8 Deuxième bobine, encoches : 13-14 et 19-20
Phase 2	A_2 ..... : 5- 6 et 11-12 B_2 ..... : 17-18 et 23-24
Phase 3	A_3 ..... : 9-10 et 15-16 B_3 ..... : 21-22 et 3- 4

Pour établir ce tableau, on débute par les deux premières encoches de la phase 1, puis on saute les encoches 3-4-5-6 destinées aux phases 2 et 3 avant de placer les faisceaux 7-8.

Ce bobinage étant à nombre entier d'encoches par pôle et par phase, le pas des bobines sur le stator est facile à déterminer. En effet, si nous avons 2 encoches par pôle pour une phase, nous aurons 6 encoches par pôle pour les trois phases, d'où la nécessité de laisser 4 encoches libres pour les deux autres phases avant de placer les faisceaux qui composeront le deuxième pôle de la phase 1.

De ce fait, la première bobine occupera les encoches 1-2 et 7-8, les encoches 3-4 étant réservées à la phase 2 et les encoches 5-6 à la phase 3.

Pour placer la deuxième bobine de la phase 1, il faut sauter 4 encoches à partir de l'encoche 8, ce qui nous conduit aux encoches 13-14 et 19-20 (*fig. XII*-13).

Si nous choisissons l'encoche 1 pour l'entrée de la phase 1, l'entrée de la phase 2 ne se fera pas sur les faisceaux de la phase qui succède à la phase 1, mais sur le faisceau 5 qui se trouve à 120° électriques du faisceau 1.

Remarques :

L'entrée de la deuxième phase pourrait se faire sur le faisceau 6, ce qui ne changerait rien à la polarité.

C'est l'option adoptée pour la première phase qui détermine le procédé que l'on utilisera pour les deux autres phases.

Cet enroulement est sur deux plans seulement parce que l'on a pour chaque phase une grande et une petite bobine. Avec deux bobines égales, on a trois plans.

Dans les enroulements bipolaires triphasés à bobines concentriques (*fig. XII*-21), et dans les enroulements multipolaires, ***lorsque le stator comporte un nombre impair de paires de pôles, on évite de répartir les têtes de bobines sur trois plans en utilisant une bobine mixte,*** comme l'indique la *figure XII*-38.

Cette bobine est dissymétrique ; elle possède deux faisceaux de longueur différente qui la font passer d'un plan à l'autre.

Avec un bobinage à sections gabariées comprenant 24 encoches, chaque section embrasse quatre encoches si le pas est raccourci (*fig. XII*-25), plus une encoche si le pas est diamétral (*fig. XII*-24) et six encoches si le pas est allongé, comme l'indique la *figure XII*-26.

XII,5. DISPOSITIONS DES ENTRÉES DE PHASES

a) Les faisceaux d'une phase peuvent être mis en série dans un ordre quelconque, pourvu que le courant qui les parcourt soit dirigé dans le sens convenable. Cette facilité permet de raccourcir ou d'allonger le pas des sections d'un bobinage. (voir les *fig. XII*-25 et *XII*-26).

b) **Si q est un nombre entier,** l'entrée d'une phase peut être effectuée sur l'une quelconque des sections, à condition de ne pas intervertir l'entrée et la sortie. Dans une machine triphasée, cette latitude permet de placer les entrées des trois phases à des distances différentes de 120° électriques.

Quand q est un nombre fractionnaire, il est nécessaire de placer les entrées des phases à 120° électriques l'une de l'autre.

c) Dans un enroulement triphasé, les entrées des phases se placent à 120° géométriques l'une de l'autre quand il s'agit de ***rotors bobinés.*** Ce dispositif a l'avantage d'équilibrer au maximum la répartition du cuivre sur la périphérie du tambour.

d) **Pour faire ressortir les pôles sur un schéma, on inverse le sens des flèches d'une des phases.** Dans la phase E_3 par exemple, le sens du courant est en opposition avec celui des phases E_1 et E_2.

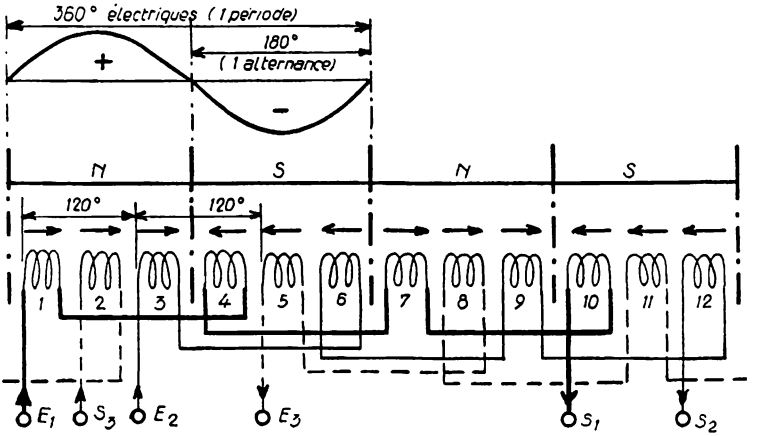


FIG. XII-9. — Schéma de principe d'un stator de moteur asynchrone triphasé à 4 pôles. Chaque phase comprend 1 bobine par pôle. Les trois entrées sont placées à 120° électriques l'une de l'autre, ce qui donne à l'entrée de la troisième phase un courant de sens inversé sur le dessin. Toutes les phases devront avoir un courant de même sens sous un pôle. La sinusoïde a une alternance positive sous le pôle nord et une alternance négative sous le pôle sud.

e) **Disposition classique à 120° électriques** des entrées et sorties des phases dans un moteur asynchrone triphasé à 4 pôles. Chaque pôle est constitué par le quart des encoches. Dans la *figure XII-9*, on a 12 bobines, soit : $\frac{12}{4} = 3$ bobines ou encoches par pôle et 1 bobine par phase et par pôle.

La bobine de chaque phase devra occuper la même place sous chaque pôle.

Exemple : si nous choisissons la première bobine à gauche pour l'entrée de la phase 1, nous relierons entre elles toutes les premières bobines placées à gauche sous chaque pôle, pour former la phase 1. Ce faisant, il faut inverser chaque fois le sens du courant dans les bobines qui se succèdent pour former alternativement un pôle N et un pôle S.

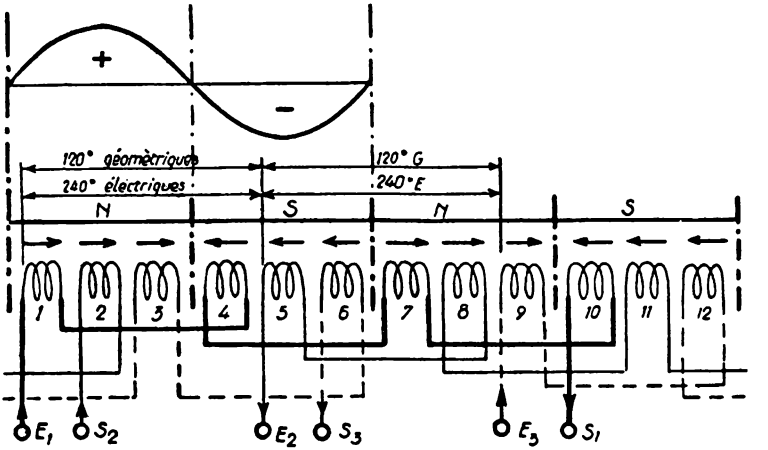


FIG. XII-10. — Le stator est le même que celui de la figure précédente, mais les entrées sont disposées à 240° électriques les unes des autres (cas utilisé pour les rotors, afin d'obtenir un meilleur équilibrage mécanique). Ici, c'est le courant de la phase 2 qui est en opposition avec les courants des phases E_1 et E_3, mais le sens du courant n'a pas changé dans les bobines, ce qui est essentiel.

Le sens du courant, à un instant considéré, est donné par les flèches placées au dessus des bobines dans la figure *XII*-9.

L'entrée de la phase 2 devant se trouver à 120° électriques de celle de la phase 1, ce sont les bobines 3, 6, 9 et 12 qui constitueront la phase 2, tout en respectant sous chaque pôle le sens du courant donné à la phase 1.

L'entrée de la phase 3 se fera à 120° électriques de celle de la phase 2, ce qui la place sous un pôle sud alors que les entrées 1 et 2 sont situées sous un pôle nord.

Dans cette phase, le courant est de sens opposé à celui du courant dans les phases 1 et 2, ce qui est logique, et nous avons ainsi, sous chaque pôle, trois phases dont les courants sont dirigés dans le même sens pour former un pôle.

Chaque pôle donne une alternance positive ou négative ; deux pôles forment une période.

Le fait que le sens du courant est inversé à l'entrée de la phase 3 sur le dessin n'a aucune influence sur la réalisation pratique du bobinage. Les trois entrées E_1, E_2 et E_3 devront être placées dans l'ordre sur la plaque à bornes.

5,1. Répartition des encoches sous les pôles

Dans un enroulement polyphasé on a :

$$q = \frac{N}{m \times 2\ p} \text{ encoches par pôle et par phase.}$$

N : nombre d'encoches total;

m : nombre de phases.

Les enroulements les plus rationnels sont les bobinages dit réguliers, à pôles normaux, constitués par un nombre entier d'encoches par pôle et par phase.

Si le bobinage est polyphasé, il doit comprendre un nombre identique de conducteurs par phase; de plus, il convient qu'en deux points diamétralement opposés de l'entrefer, on trouve toujours la même phase.

XII,6. DIFFÉRENTS TYPES D'ENROULEMENTS TRIPHASÉS

Ceux-ci peuvent se classer :

1 — **En enroulements réguliers,** à pas diamétral avec un nombre entier d'encoches par pôle et par phase. On appelle pas diamétral, un pas égal au pas polaire.

2 — **En enroulements semi-réguliers,** qui peuvent être bobinés :

— avec un pas raccourci, q entier et pair ;

— avec un pas raccourci et q fractionnaire.

q = nombre d'encoches par pôle et par phase.

3 — **En enroulements irréguliers,** qui ne seront pas traités dans cet ouvrage.

6,1. Les enroulements réguliers

Un enroulement est dit régulier s'il répond aux conditions suivantes :

— pas Y du bobinage diamétral ;

— un nombre entier d'encoches par pôle et par phase ;

— un écart angulaire Θ entre phases rigoureusement égal à $\frac{2\pi}{m}$, soit $\frac{360^\circ}{3} = 120^\circ$ électriques en triphasé.

m = nombre de phases.

Pour ces enroulements, le coefficient de bobinage k_1 peut se calculer avec la formule générale :

$$k_1 = \frac{\sin\left(\frac{q\,\alpha}{2}\right)}{q \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)}.$$

α : écart angulaire en degrés électriques, pris entre deux encoches consécutives.

Vérification de la formule.

Application de l'exemple à la figure *XII*-17 qui concerne le schéma de bobinage de la *figure XII*-16.

Enroulement bipolaire d'un stator triphasé 24 encoches à 4 encoches par pôle et phase.

Ecart angulaire entre encoches : $\alpha = \frac{360^\circ}{24} = 15^\circ$,

$$k_1 = \frac{\sin\left(\frac{4 \times 15}{2}\right)}{4 \times \sin\left(\frac{15}{2}\right)} = \frac{\sin 30^\circ}{4 \times \sin 7^\circ 30} = \frac{0{,}5}{4 \times 0{,}13} = 0{,}957.$$

6,2. Les enroulements semi-réguliers

Ce sont des bobinages qui ne répondent pas à l'une ou aux deux conditions exigées des enroulements réguliers.

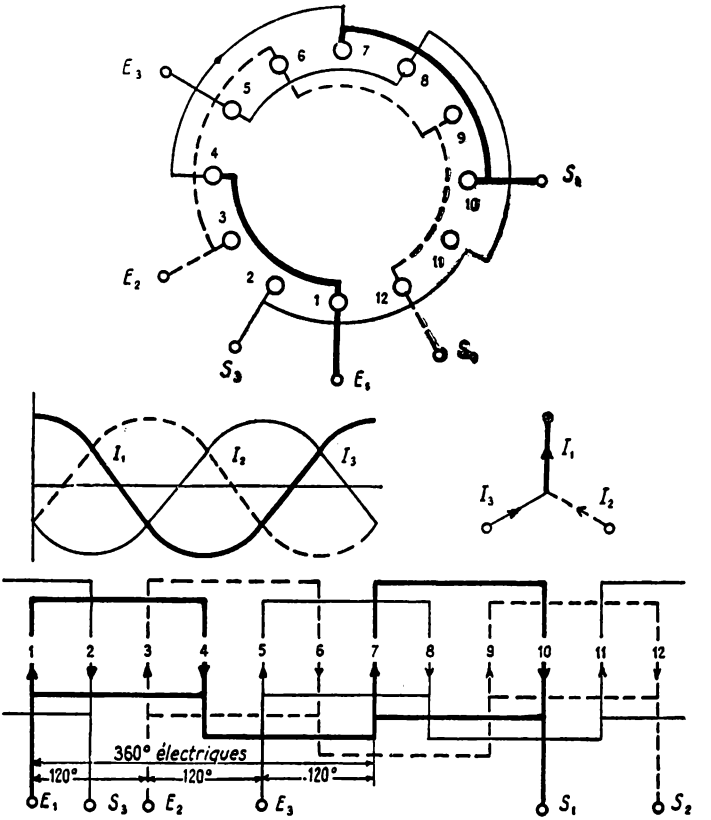


FIG. XII-11. — Représentation frontale et développement panoramique du bobinage d'un stator de moteur asynchrone à nombre entier d'encoches par pôle et par phase.

L'enroulement comporte 4 pôles logés dans 12 encoches. Les entrées et sorties des trois phases sont décalées de 120° électriques, c'est-à-dire du tiers du double pas polaire.

La figure sinusoïdale permet de constater qu'à l'instant considéré sur l'ordonnée et dans la représentation vectorielle, l'intensité I_1 est maximale et positive dans l'encoche 1 et que les intensités I_2 et I_3 sont négatives et égales à $\frac{I \text{ maximale}}{2}$ chacune.

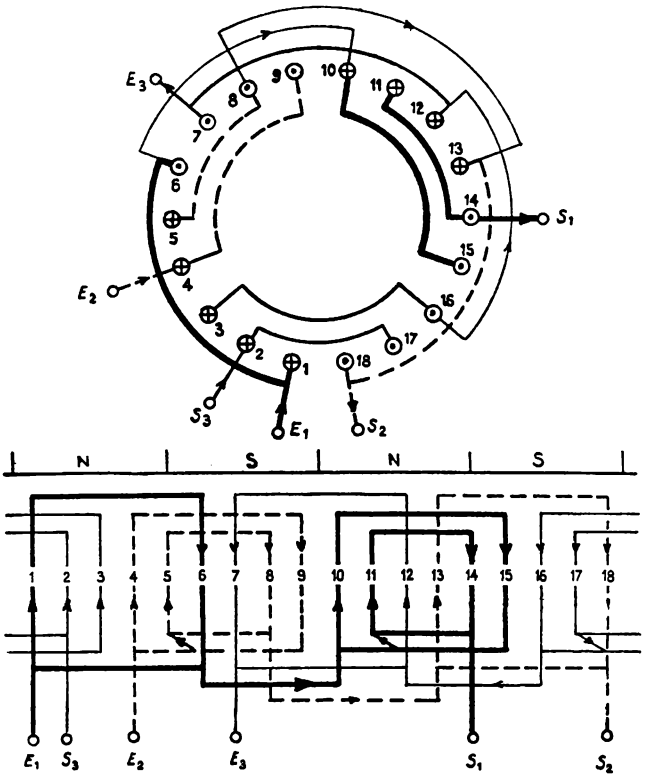


FIG. XII-12. — Représentation frontale et développement panoramique du bobinage d'un stator de moteur asynchrone triphasé, 18 encoches, 4 pôles, à nombre fractionnaire d'encoches par pôle et par phase.

($q = \frac{18}{3 \times 4} = 1{,}5$ encoche par pôle et par phase).

En ajoutant 6 encoches au stator de la figure précédente, on a réalisé un stator de moteur à 18 encoches dont chaque phase est constituée par une bobine longue et une courte. L'enroulement, quoique fractionnaire, est symétrique; le nombre d'encoches est divisible par 3.

On remarque sur le schéma que les pôles sont formés alternativement par 5 et par 4 encoches, soit $\frac{9}{2} = 4{,}5$ encoches par pôle.

Parmi les enroulements semi-réguliers, on remarque :

a) les bobinages triphasés, avec pas diamétral et q fractionnaire ;

b) les bobinages triphasés, avec pas raccourci et q entier et pair ;

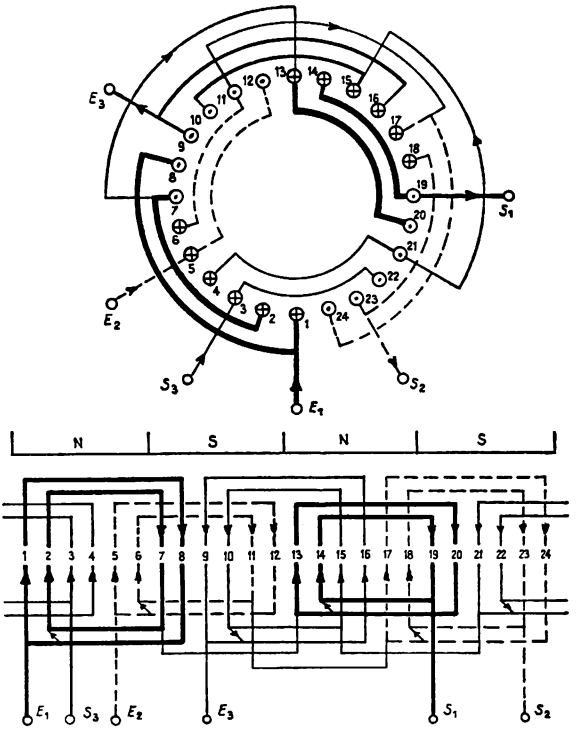


FIG. XII-13. — Représentation frontale et panoramique du bobinage d'un stator de moteur asynchrone triphasé 24 encoches, 4 pôles, à nombre entier d'encoches par pôle et par phase. L'enroulement à pôles conséquents est réalisé avec des bobines inégales concentriques disposées sur deux plans. Avec des bobines identiques pour chaque phase on a 3 plans.

Cet enroulement a 6 encoches de plus que celui de la figure précédente, ce qui permet d'obtenir un nombre entier d'encoches par pôle et par phase, soit 2 encoches par pôle et par phase.

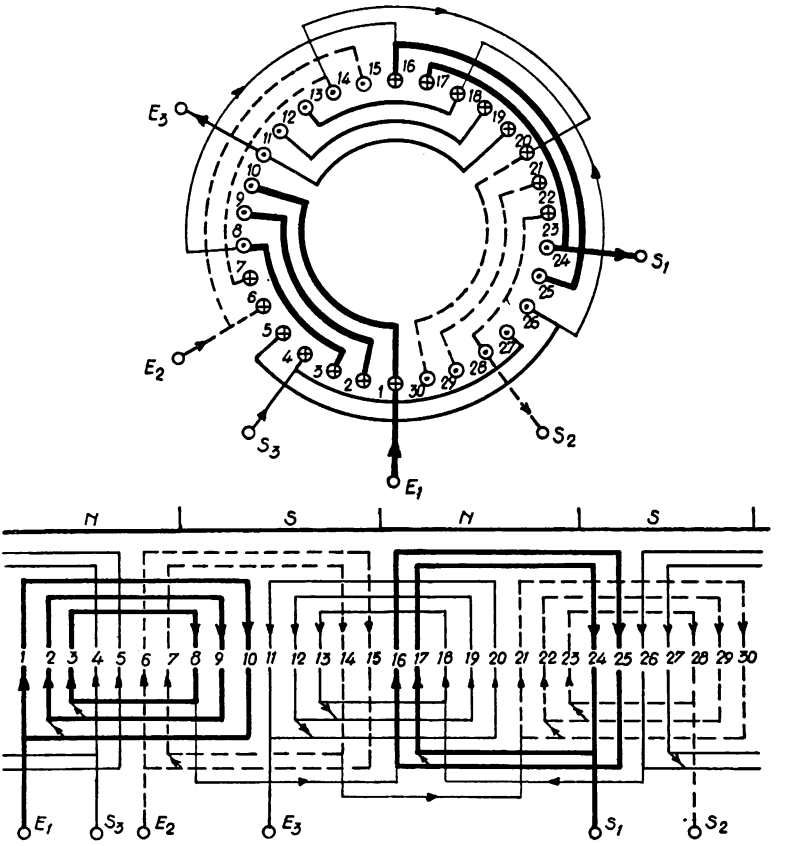


FIG. XII-14. – Bobinage semi-régulier à pas diamétral d'un stator triphasé de 30 encoches, 4 pôles. Présentation frontale et développement panoramique de l'enroulement, qui est à nombre fractionnaire d'encoches par pôle et par phase, soit :

$$q = \frac{30}{3 \times 4} = 2{,}5 \text{ encoches par pôle et par phase } (k_1 = 0{,}957).$$

Dans chaque phase on a deux pôles à 3 encoches et deux pôles à 2 encoches. Les entrées des phases sont à 120° électriques l'une de l'autre. Ce bobinage semi-régulier est disposé sur deux plans seulement en adoptant une petite et une grande bobine par phase. Avec des bobines égales on aurait trois plans.

c) les bobinages triphasés, avec pas raccourci et q entier et impair ;

d) les bobinages avec pas raccourci et q fractionnaire.

Pour ces enroulements, le coefficient de bobinage k_1 ne peut plus être trouvé avec la formule générale indiquée pour les enroulements réguliers, car elle ne tient pas compte du raccourcissement du pas. (Voir exemples dans le chapitre des alternateurs).

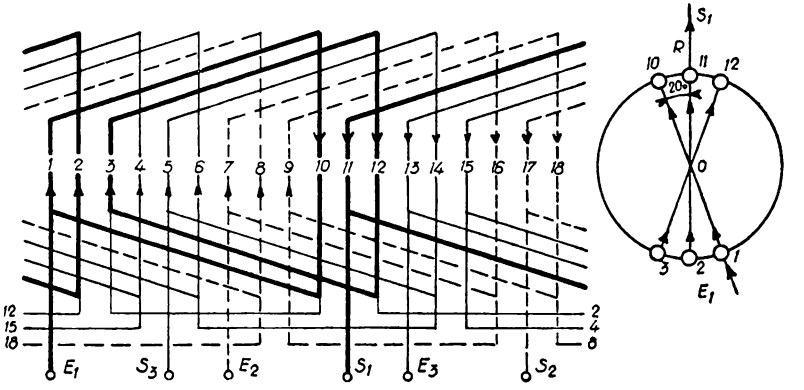


FIG. XII-15. — Schéma de bobinage d'un stator triphasé 18 encoches, 2 pôles, 1 faisceau par encoche, pas diamétral 1 à 10.

Ecart angulaire entre deux encoches : $\frac{360}{18} = 20°$.

Calcul du coefficient de bobinage k_1 d'après la figure :

$$0 - 10 + 0 - 1 = 2 \cos 20° = 2 \times 0{,}939\,6$$
$$0 - 11 + 0 - 2 = 2 \cos 0° = 2 \times 1{,}000\,0$$
$$0 - 12 + 0 - 3 = 2 \cos 20° = 2 \times 0{,}939\,6$$
$$2 \times 2{,}879\,2$$

et $k_1 = \frac{2{,}879}{3} = 0{,}959.$

Pour trouver des explications sur le calcul de k_1, consulter la figure *XII*-17.

XII,7. BOBINAGES A NOMBRE FRACTIONNAIRE D'ENCOCHES PAR POLE ET PAR PHASE

Ces derniers sont désignés sous le nom de bobinages à trous partiels. On pourrait ainsi avoir : 1,25 trou (encoche) par pôle et par phase, ou encore : 2,5 trous, etc...

Les enroulements à nombre fractionnaire d'encoches peuvent à leur tour être divisés :

a) **En bobinages symétriques,** ayant dans chaque phase une F.E.M. égale, décalée du même angle.

Dans ces enroulements, le nombre d'encoches devra toujours être divisible par 3.

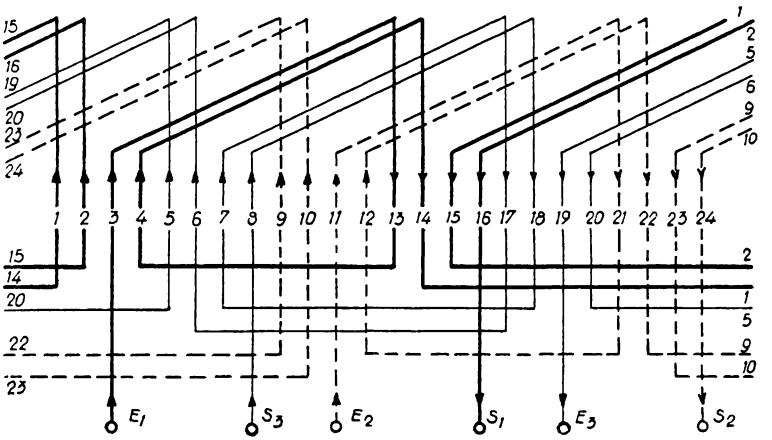


FIG. XII-16. — Schéma de bobinage d'un stator triphasé 24 encoches, 2 pôles, 1 faisceau par encoche, pas raccourci 0 à 10.

$$q = \frac{24}{3 \times 2} = 4 \text{ encoches par pôle et par phase.}$$

D'autre part, si l'on utilise un nombre fractionnaire d'encoches par pôle et par phase, il faut, pour réaliser un bobinage symétrique, que le nombre d'encoches soit un multiple de 3, et que la partie fractionnaire du nombre d'encoches par pôle et par phase, réduite à sa plus simple expression, ait un dénominateur qui ne soit pas un multiple de 3.

b) **En bobinages asymétriques,** ces conditions ne sont pas rigoureusement satisfaites, d'où un certain décalage angulaire entre les trois phases.

Ce décalage est d'autant plus faible que le nombre d'encoches du stator est grand. Dans tous les cas, il devra être tel que les F.E.M. ne diffèrent pas de plus de 1 % entre les trois phases.

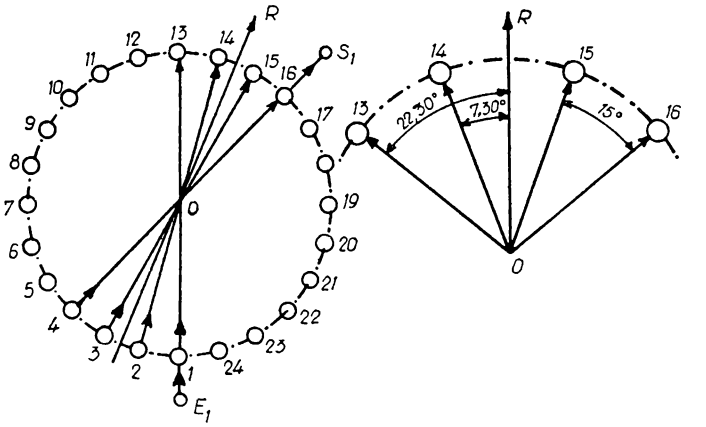


FIG. XII-17. — Calcul du coefficient de bobinage d'un stator bipolaire de moteur asynchrone triphasé 24 encoches (voir fig. *XII*-16).

Les conducteurs d'une phase sont répartis dans 8 encoches formant 2 pôles, soit 4 encoches par pôle et par phase.

Pour calculer le coefficient de bobinage k_1 on choisit les encoches formant un pôle d'une phase, soit par exemple les encoches 13-14-15 et 16.

Dans un stator à 24 encoches, l'écart angulaire entre encoches est de $\frac{360^\circ}{24} = 15^\circ$.

On trace une ligne médiane R dans l'axe d'un pôle et l'on a :

$$R \rightarrow 14 = 7{,}30^\circ \text{ soit } \cos 7{,}30^\circ = 0{,}991$$
$$R \rightarrow 13 = 22{,}30^\circ \text{ soit } \cos 22{,}30^\circ = 0{,}924$$
$$1{,}915$$

D'où $k_1 = \frac{1{,}915}{2} = 0{,}957$.

Tout comme dans la figure XII-15, on aurait pu multiplier par 2 les cos 7,30° et 22,30° puisque les flèches partant des encoches 1-2-3 et 4 sont dirigées dans le même sens. Ce procédé n'aurait rien changé car il faudrait alors diviser la somme des cosinus par 4.

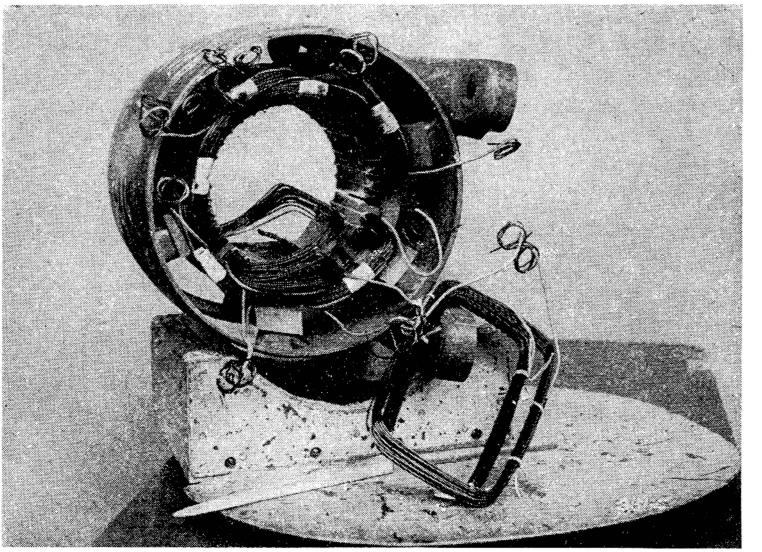


FIG. XII-18. — Petit moteur triphasé 4 pôles en cours de montage. Toutes les bobines qui constituent une phase ont été bobinées sur un gabarit unique, ce qui supprime les soudures entre bobines.

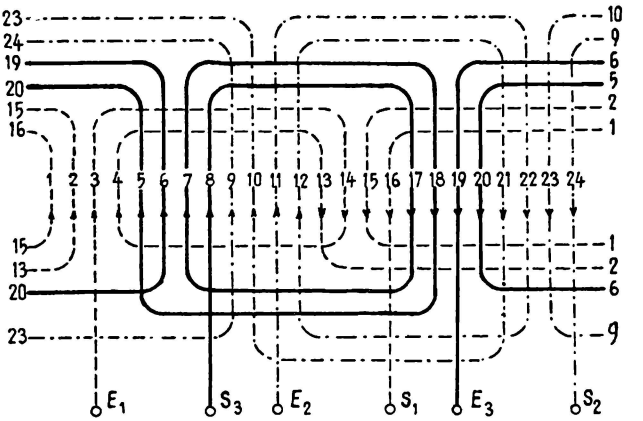


FIG. XII-19. — Schéma de bobinage d'un stator triphasé bipolaire, 24 encoches, enroulement concentrique sur 3 plans, à pôles alternés (imbriqué).

Dans les bobinages symétriques et asymétriques à trous partiels, il arrive que l'on soit amené à laisser des encoches vides. Dans ce cas, lorsque le nombre des rainures vides est divisible par 3, on les répartit à 120° sur la périphérie du stator, ce qui n'est pas toujours possible. (Voir *fig. XII*-38).

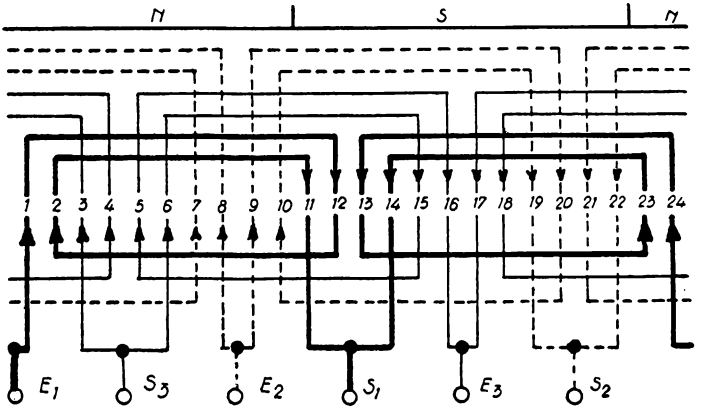


FIG. XII-20. — Schéma du bobinage bipolaire d'un stator triphasé comportant 24 encoches connectées en deux parties parallèles. L'enroulement est réparti sur trois plans.

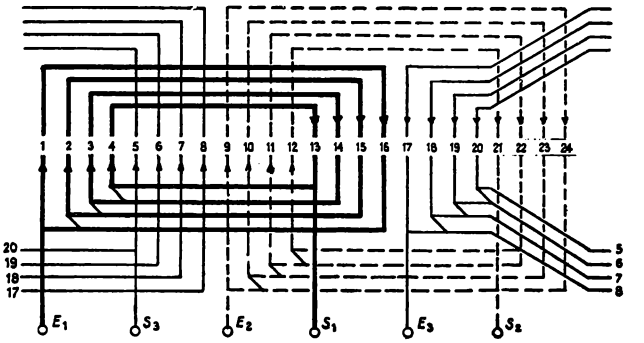


FIG. XII-21. — Schéma de bobinage d'un stator triphasé 24 encoches, 2 pôles, 1 faisceau par encoche, bobines concentriques à pôles conséquents.

Trois groupes de bobines sont nécessaires, **mais avec** une **bobine** du type mixte, on réduit l'enroulement à 2 plans.

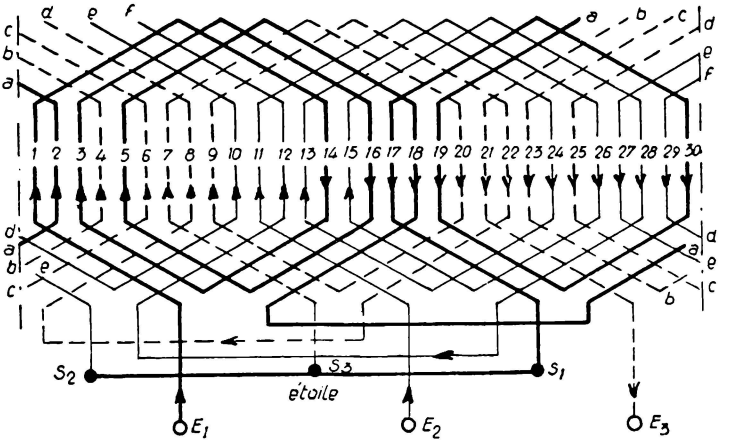


FIG. XII-22. — Schéma de bobinage d'un stator triphasé, 2 pôles, 30 encoches, 1 faisceau par encoche, relié en étoile, pas de 0 à 13. On remarque que le courant est inversé dans les faisceaux des encoches 14 et 15.

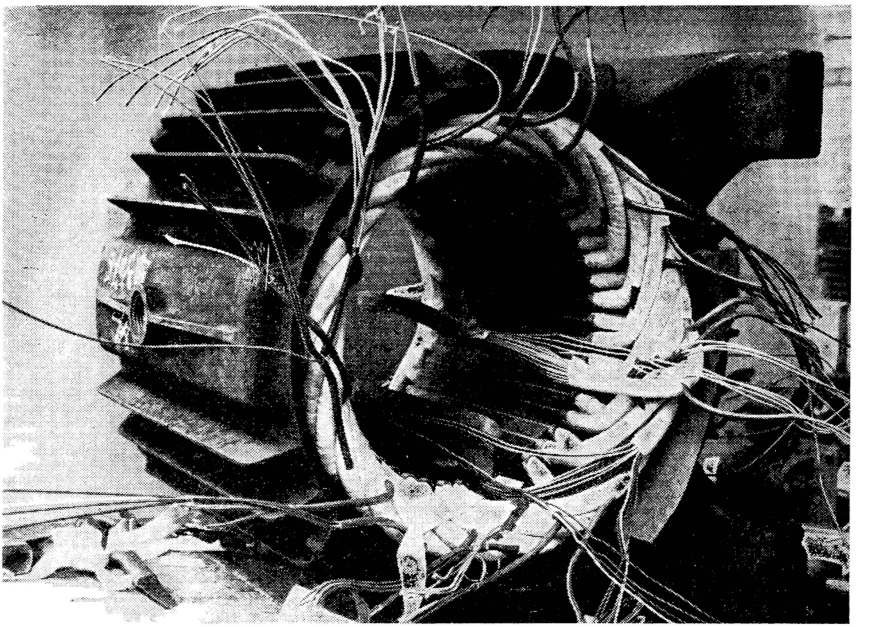


FIG. XII-23. — Stator de moteur triphasé à bobines enchevêtrées. Les sections sont préparées d'avance et les conducteurs sont égrenés dans les encoches. Les têtes de bobines sont isolées à la tresse au fur et à mesure de la pose des sections.

Les sorties sont renforcées avec un souplisso. La carcasse est à ailettes pour activer le refroidissement (Document ALSTHOM, Belfort).

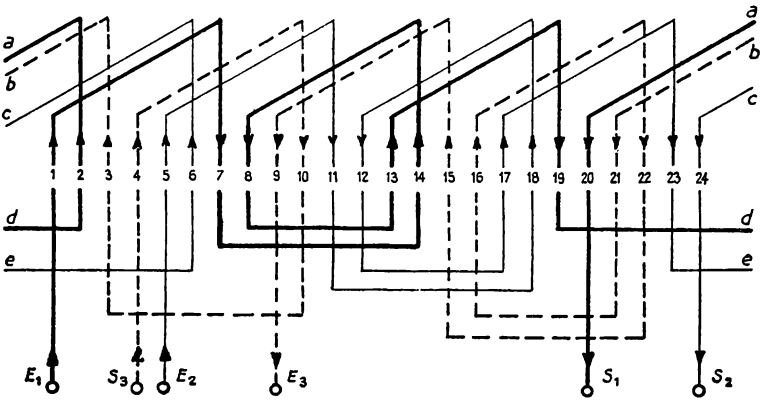


FIG. XII-24. — Schéma de bobinage d'un stator triphasé 24 encoches, 4 pôles alternés, 1 faisceau par encoche, *pas diamétral* 1 à 7 (0 à 6).

$$q = \frac{24}{4 \times 3} = 2 \text{ encoches par pôle et phase.}$$

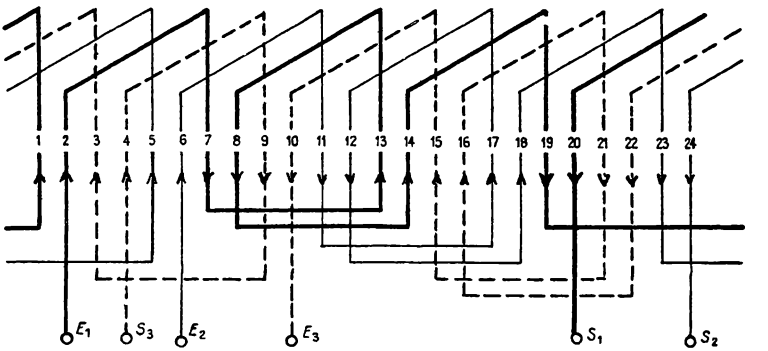


FIG. XII-25. — Schéma de bobinage d'un stator triphasé, 24 encoches, 4 pôles alternés, 1 faisceau par encoche, *pas raccourci* 1 à 6, sections gabariées enchevêtrées.

$$q = \frac{24}{4 \times 3} = 2 \text{ encoches par pôle et phase.}$$

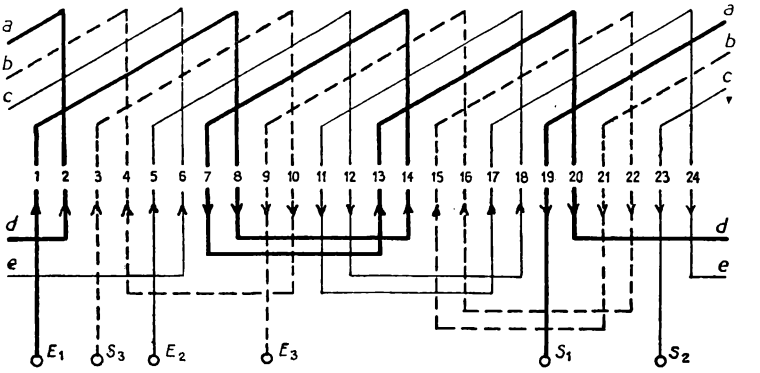


FIG. XII-26. — Schéma de bobinage d'un stator triphasé, 24 encoches, 4 pôles alternés, 1 faisceau par encoche, ***pas allongé*** 1 à 8, sections gabariées enchevêtrées.

$$q = \frac{24}{4 \times 3} = 2 \text{ encoches par pôle et phase.}$$

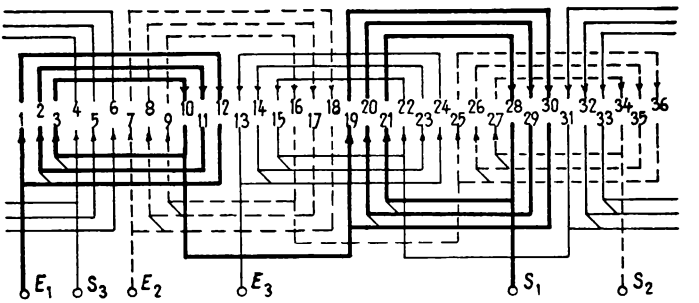


FIG. XII-27. — Schéma d'un stator triphasé, 4 pôles, 36 encoches, enroulement à bobines concentriques disposées sur deux plans (bobines longues et bobines courtes). Les entrées sont à 120° électriques.

$$q = \frac{N}{2p \times m} = \frac{36}{4 \times 3} = 3 \text{ encoches par pôle et phase.}$$

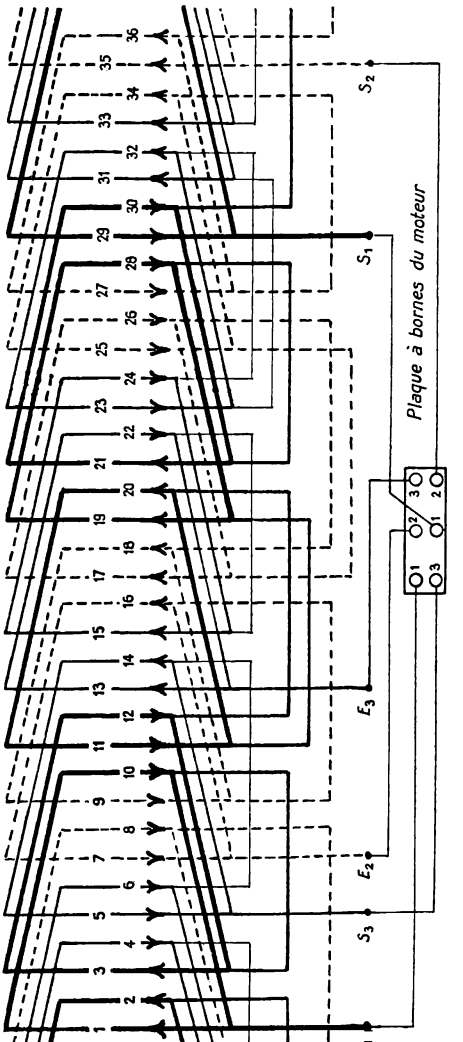


FIG. XII-28. — Schéma de bobinage d'un stator triphasé, 36 encoches, 4 pôles, 1 faisceau par encoche, pas diamétral 1 à 10, sections gabariées enchevêtrées.

$$q = \frac{36}{4 \times 3} = 3 \text{ encoches par pôle et phase.}$$

Les entrées et sorties des phases sont reliées à la plaque à bornes en ayant soin de veiller à ce que l'entrée et la sortie d'une même phase ne soient pas placées l'une en face de l'autre. Dans cette éventualité, aucun courant ne circulerait dans l'enroulement lors de la mise en triangle sur la plaque à bornes.

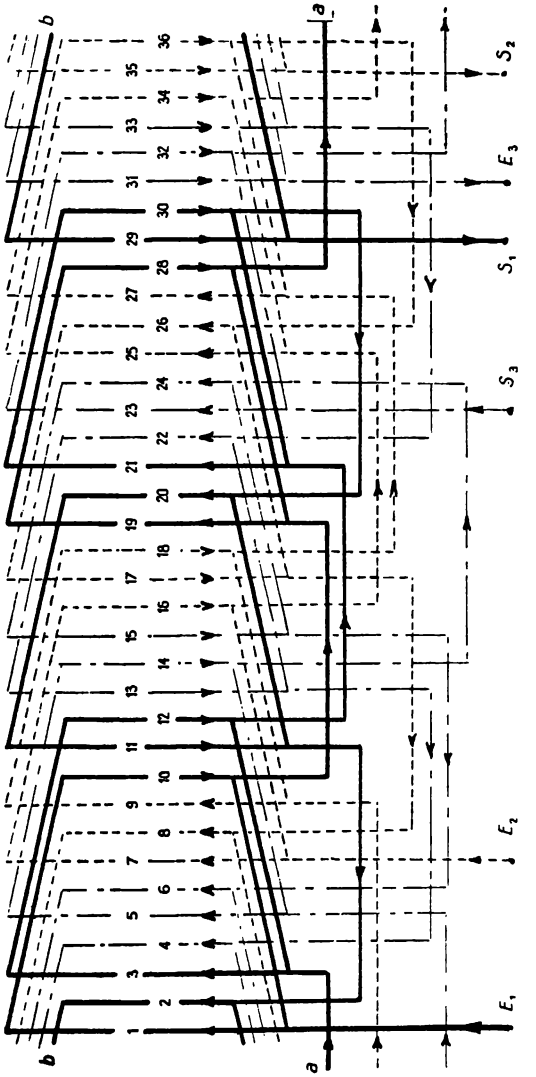


FIG. XII-29. — Schéma de bobinage d'un stator triphasé, 36 encoches, 4 pôles, 1 faisceau par encoche, pas diamétral 1 à 10, sections gabariées enchevêtrées. Couplage « ondulé rétrograde » (variante de la figure précédente).

On parcourt les deux tiers des faisceaux en avançant dans un sens, puis on rétrograde pour parcourir le reste des faisceaux.

$$q = \frac{36}{4 \times 3} = 3 \text{ encoches par pôle et phase.}$$

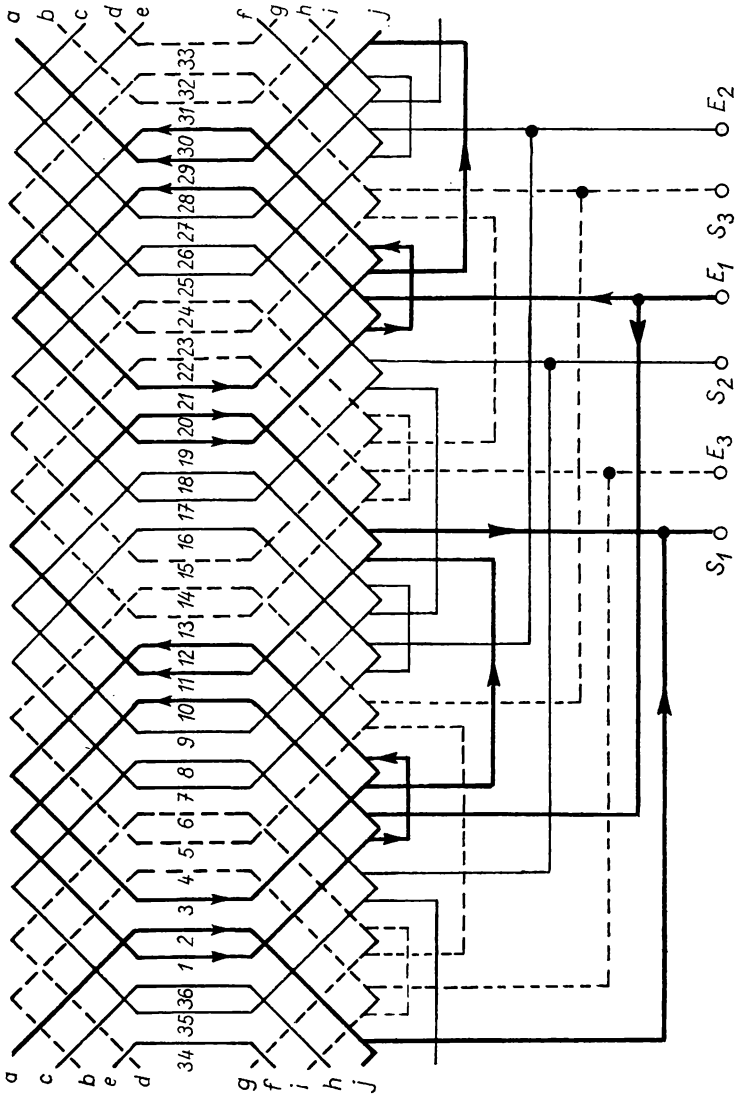


FIG. XII-30. — Schéma de bobinage d'un stator triphasé, 36 encoches, 4 pôles, 1 faisceau par encoche, pas diamétral 1 à 10, sections gabariées enchevêtrées. Couplage en deux ondes parallèles.

$$q = \frac{36}{4 \times 3} = 3 \text{ encoches par pôle et phase.}$$

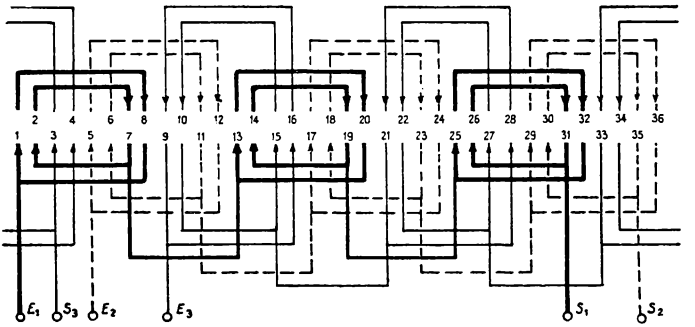


FIG. XII-31. — Schéma de bobinage d'un stator triphasé 36 encoches, 6 pôles, 1 faisceau par encoche, enroulement concentrique à pôles conséquents (ondulé), disposé sur 3 plans.

$$q = \frac{36}{6 \times 3} = 2 \text{ encoches par pôle et phase.}$$

Le bobinage est effectué en plaçant dans l'ordre toutes les bobines courtes, puis les moyennes et, en dernier lieu, les longues.

Cet enroulement peut également être exécuté sur 2 plans, mais, dans ce cas, il faut utiliser une bobine mixte qui passe du premier plan au deuxième. (Voir *fig. XII-38*).

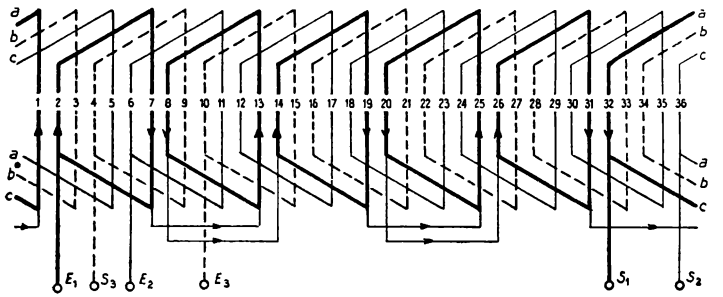


FIG. XII-32. — Schéma de bobinage d'un stator triphasé, 36 encoches, 6 pôles, 1 faisceau par encoche, pas raccourci 1 à 6, à pôles alternés, sections gabariées enchevêtrées.

$$q = \frac{36}{6 \times 3} = 2 \text{ encoches par pôle et phase.}$$

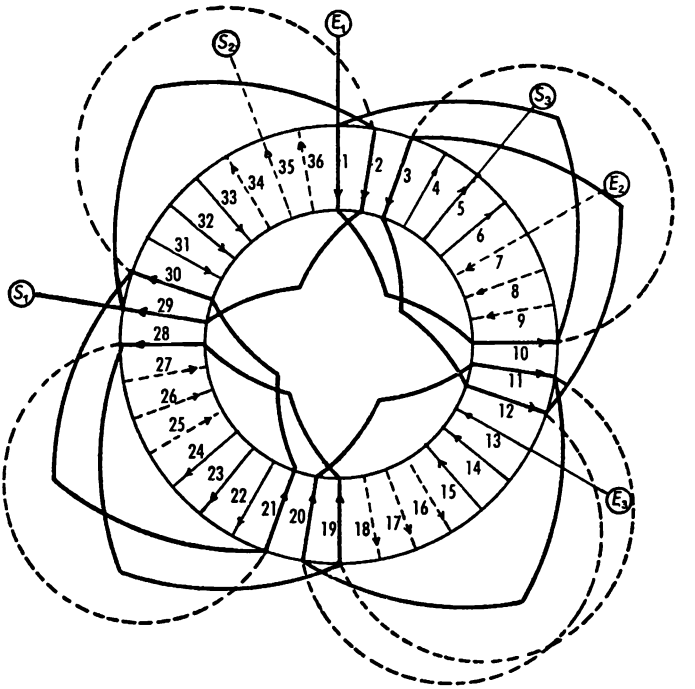


FIG. XII-33. — Schéma de bobinage triphasé, par représentation frontale, d'un stator de 36 encoches, 4 pôles, 3 encoches par pôle, 12 encoches par phase.

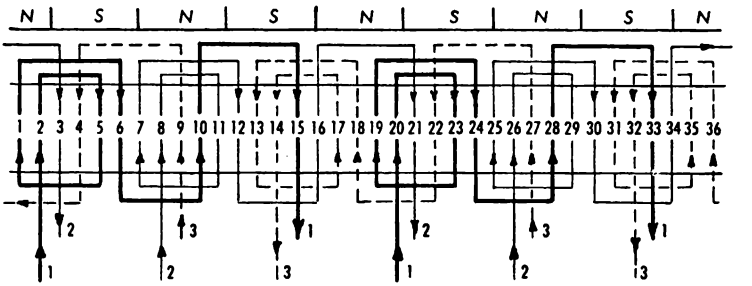


FIG. XII-34. — Schéma de bobinage triphasé, 36 encoches, 8 pôles. $q = \frac{36}{8 \times 3} = 1{,}5$ encoche par pôle et par phase. Il correspond en fait à deux enroulements de 4 pôles, 18 encoches, mis à la suite l'un de l'autre. Ces deux demi-phases semblables et en concordance, peuvent être mises soit en série soit en parallèle, en couplant les deux entrées et les deux sorties des phases. Dans ce dernier cas, la tension de fonctionnement est la moitié de celle de la marche en série.

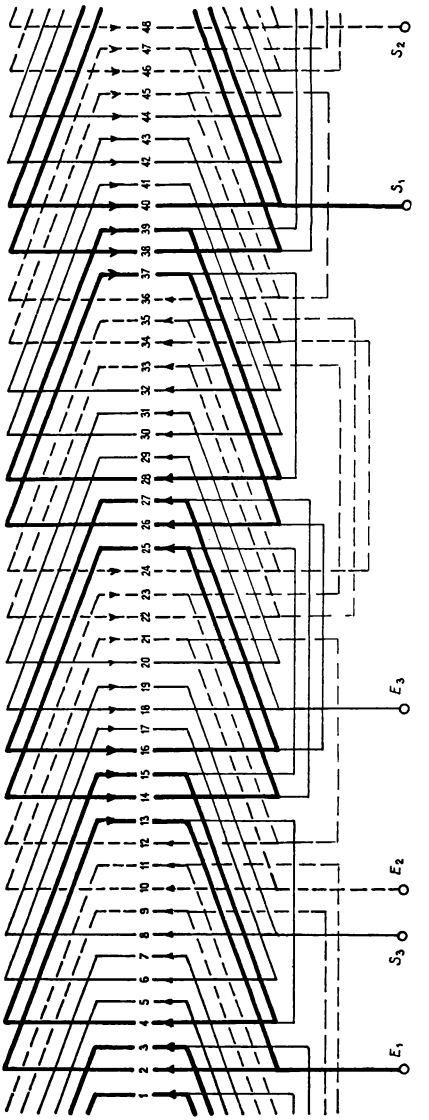


FIG. XII-35. — Schéma de bobinage triphasé, 48 encoches, 4 pôles, 1 faisceau par encoche, enroulement imbriqué à pôles alternés, pas diamétral 1 à 12 avec $k_1 = 0{,}957$.

$$q = \frac{48}{4 \times 3} = 4 \text{ encoches par pôle et phase.}$$

Les bobines de la phase 3 ne sont pas reliées afin de clarifier la figure. *Pour les relier il suffit de copier les connexions appliquées à l'une des deux autres phases.*

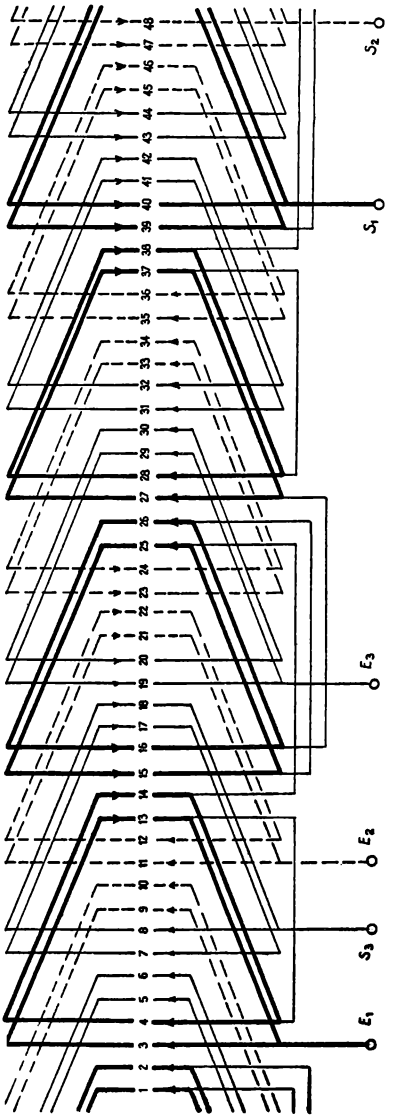


FIG. XII-36. — Schéma de bobinage triphasé, 48 encoches, 4 pôles, 1 faisceau par encoche, enroulement imbriqué à pôles alternés, pas raccourci 1 à 11.

$$q = \frac{48}{4 \times 3} = 4 \text{ encoches par pôle et phase.}$$

Les sections de la phase 1 sont seules reliées. Pour connecter les autres phases, il suffit de partir de E_2 et E_3 en opérant les liaisons entre sections comme il a été fait pour E_1.

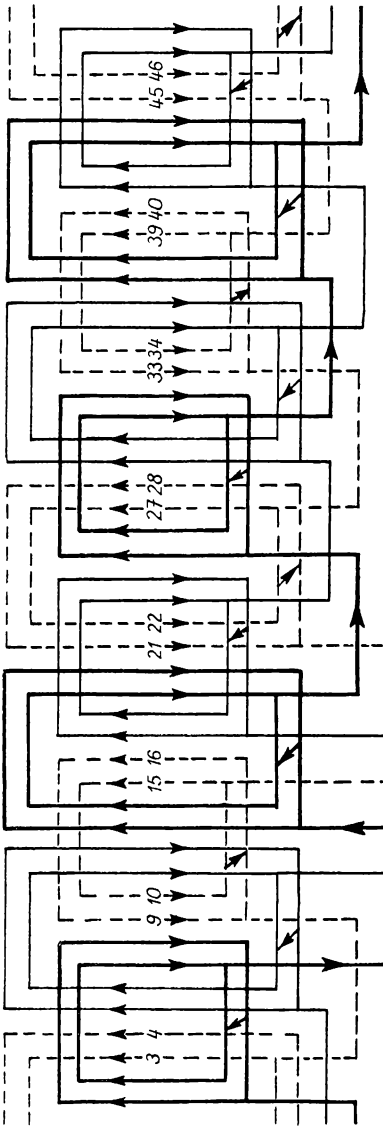


FIG. XII-37. — Schéma de bobinage d'un stator triphasé, 48 encoches, 8 pôles, 4 ondes en série, 1 faisceau par encoche, enroulement à pôles conséquents à bobines concentriques disposées sur deux plans.

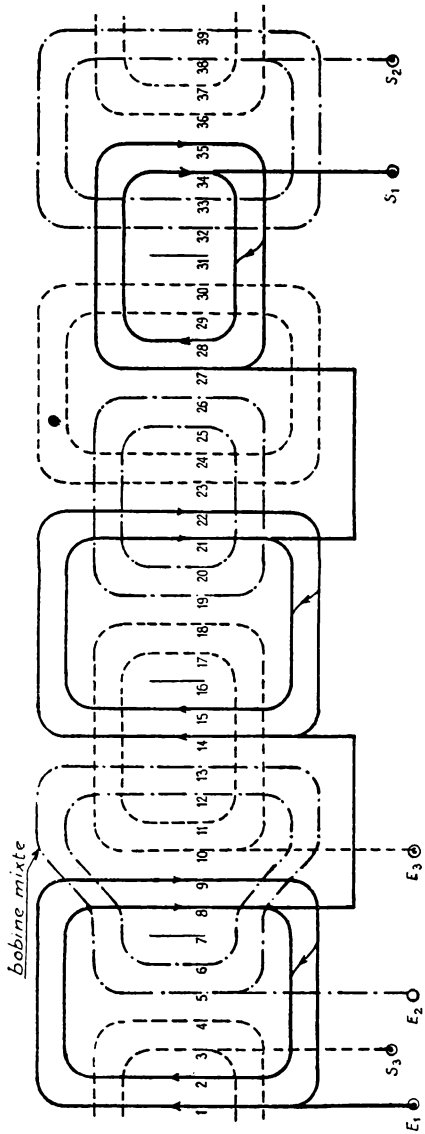


FIG. XII-38. — Schéma d'enroulement d'un stator triphasé, comportant 6 pôles, 39 encoches dont 36 bobinées et 3 vides non équidistantes sur la périphérie du stator. Le bobinage est effectué au moyen de bobines concentriques réparties sur deux plans avec une bobine mixte.

L'anomalie de ces 3 encoches vides provient du fait que certains constructeurs utilisent le même type de stator pour des enroulements à nombre variable de faisceaux, ce qui réduit le nombre des modèles de tôles encochées et des carcasses.

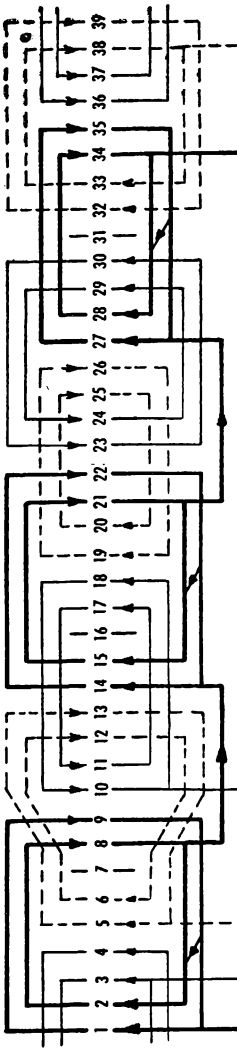


FIG. XII-39. — Schéma d'un enroulement triphasé à 39 encoches (3 encoches vides), 6 pôles, une bobine mixte. Coefficients de bobinage : phase 1 = 0,963; phases 2 et 3 = 0,957 chacune, d'où une différence sur les f.é.m. induites de 0,6 %. Seules, les connexions sont faites pour la phase 1.

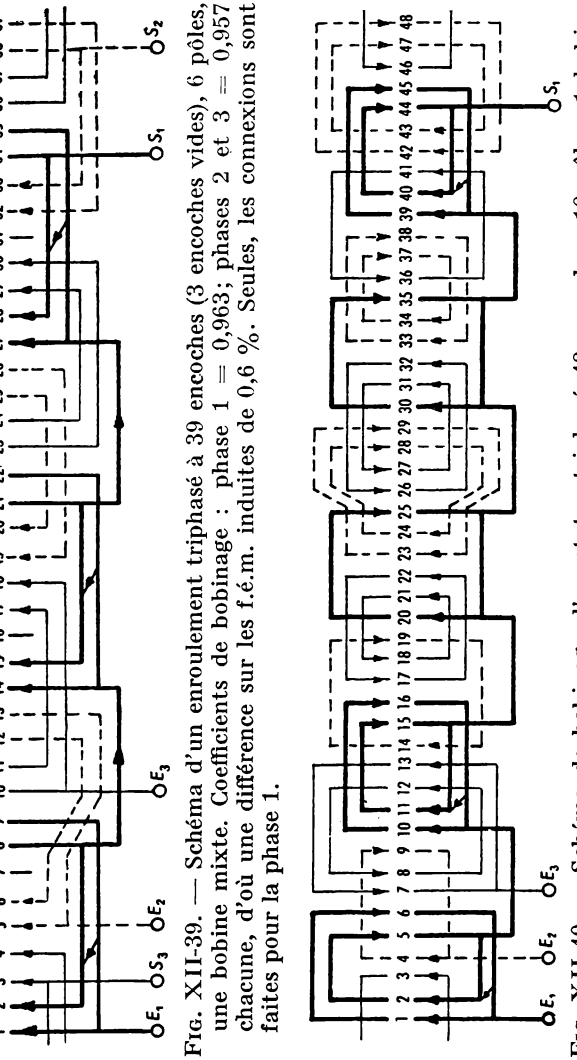


FIG. XII-40. — Schéma de bobinage d'un stator triphasé 48 encoches, 10 pôles, 1 bobine mixte. Enroulement à pôles conséquents. Seule, la phase 1 est connectée.

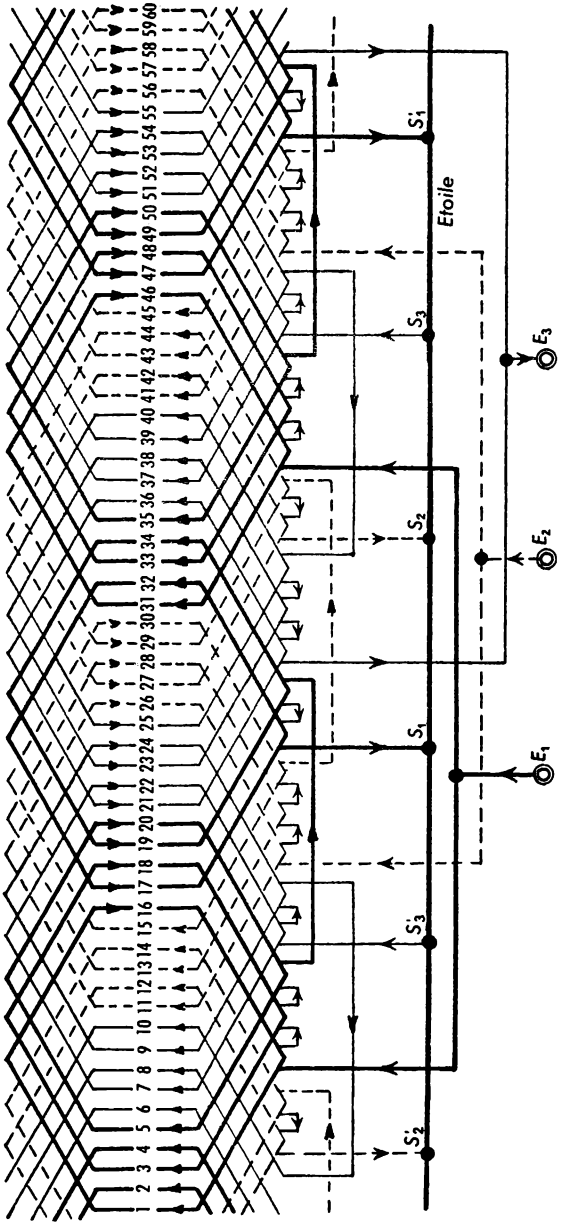


FIG. XII-41. — Schéma d'enroulement d'un stator triphasé 60 encoches, 4 pôles, pas des sections 1 à 16, 2 ondes en deux parties parallèles, 3 phases en étoile, 1 faisceau par encoche.

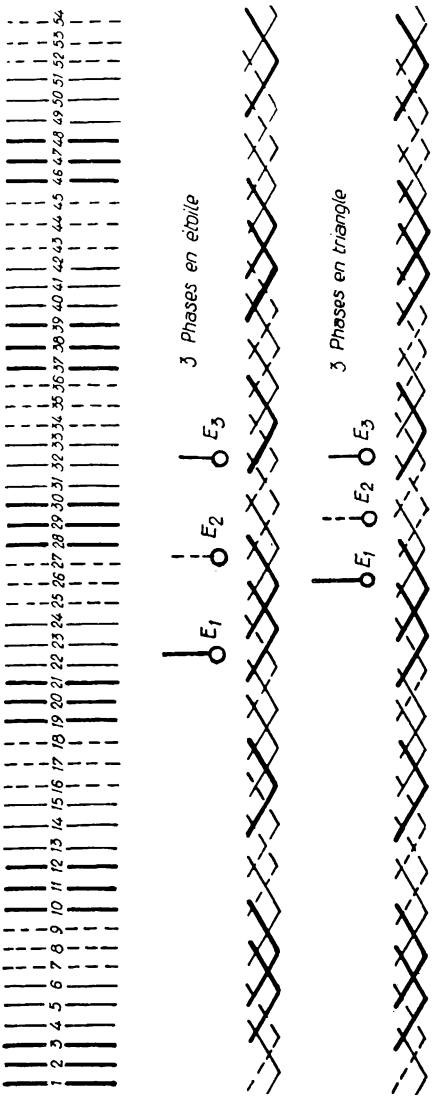


FIG. XII-42. — Sujet du C.A.P. d'électricien-bobineur, de l'Académie de Besançon, session 1956 (épreuve de schéma). Durée : 2 h, coefficient : 2. Le stator triphasé comporte 54 encoches, le bobinage a 6 pôles, un pas de 0 à 9, trois ondes en 3 parties parallèles. Les 3 schémas sont à compléter (voir figure suivante).

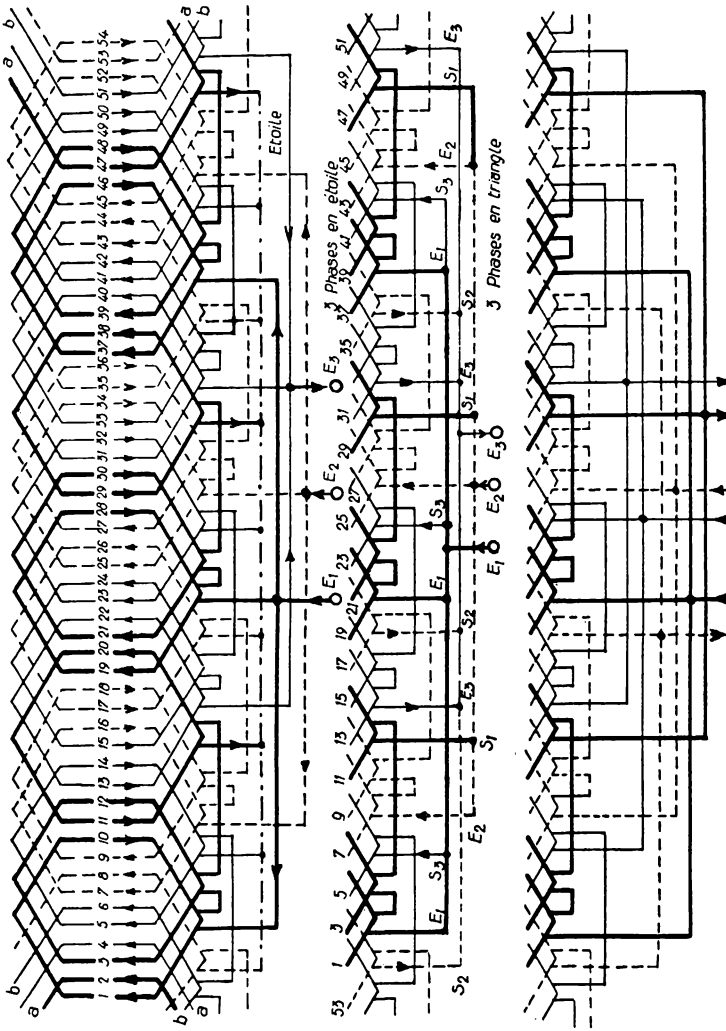


FIG. XII-43. — Réalisation de l'épreuve de schéma du C.A.P. d'électricien-bobineur de l'Académie de Besançon, session 1956. Stator triphasé, 54 encoches, 6 pôles, 3 ondes en trois parties parallèles.

En triangle on a les entrées E_1 et les sorties S_3 réunies, soit les conducteurs des encoches 1-19-37-5-23-41. Il en est de même pour E_2 et S_1, soit : 7-25-43-11-29-47 et enfin E_3 et S_2, soit : 13-31-49-17-35-53.

XII,8. BOBINAGE A DEUX FAISCEAUX PAR ENCOCHE

L'enroulement des stators peut s'exécuter à deux faisceaux de conducteurs par encoche. Il s'apparente alors à un bobinage du type manteau, employé pour les induits des machines à courant continu.

Quand il s'agit d'un enroulement à barres, on utilise des faisceaux dont les conducteurs s'assemblent au moyen de douilles soudées, pour former soit un bobinage imbriqué, soit un bobinage ondulé.

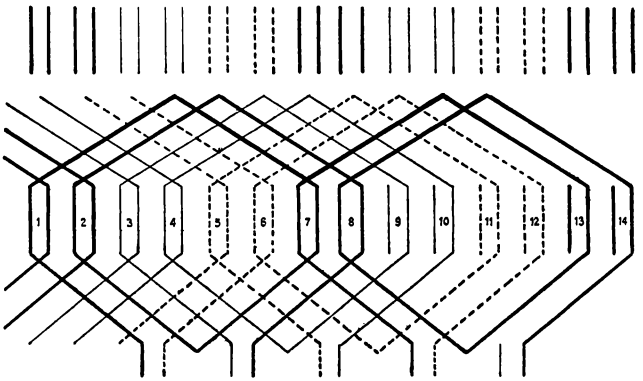


FIG. XII-44. — Schéma partiel d'un enroulement triphasé à 2 faisceaux par encoche. Il se dessine comme un enroulement d'induit de machine à courant continu, sans toutefois ponctuer les faisceaux inférieurs.

Pour marquer les encoches, on rapproche les faisceaux inférieur et supérieur d'une même encoche.

Les faisceaux placés à gauche de l'encoche forment le plan supérieur, ceux de droite le plan inférieur.

On commence le schéma en traçant les faisceaux des 3 phases de trois façons différentes, puis on relie les faisceaux de la phase 1 au pas désiré en laissant libres les encoches des phases 2 et 3. Ce travail exécuté, la liaison des faisceaux des autres phases n'est plus qu'une répétition de ce qui a été fait pour la phase 1.

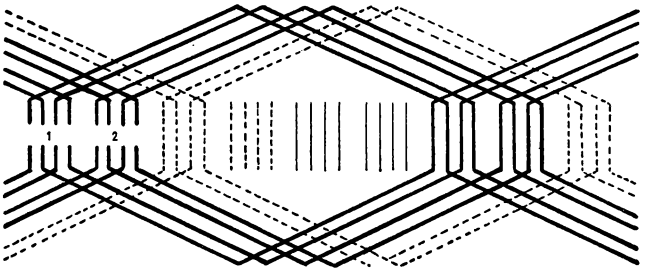


FIG. XII-45. — Pour représenter un enroulement à barres à 4 faisceaux par encoche, il suffit de rapprocher les 4 faisceaux qui font partie de la même encoche. Les faisceaux utilisés dans cette figure sont du type ondulé.

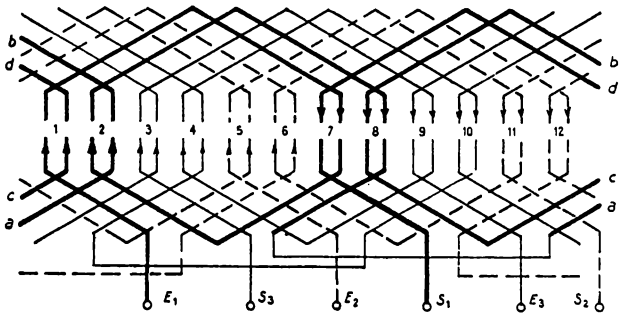


FIG. XII-46. — Schéma du bobinage triphasé bipolaire d'un stator comportant 12 encoches, 2 faisceaux par encoche, 2 encoches par pôle et phase. Pas d'encoche : 1 à 7.

La disposition des bobines est dite « enchevêtrée ».

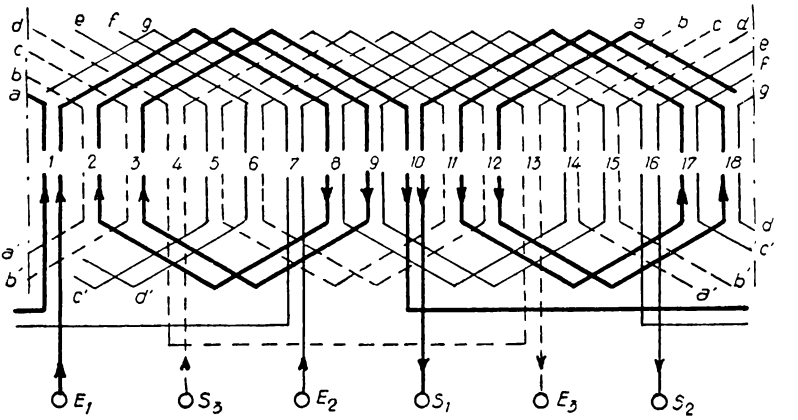


FIG. XII-47. — Schéma de bobinage d'un stator triphasé, 2 pôles, 18 encoches, 2 faisceaux par encoche, pas raccourci 0 à 7, enroulement imbriqué, $k_1 = 0{,}899$. Si l'on complète les flèches sur les phases 2 et 3, on constate que le courant n'a pas le même sens dans les faisceaux des encoches 8-9-17 et 18.

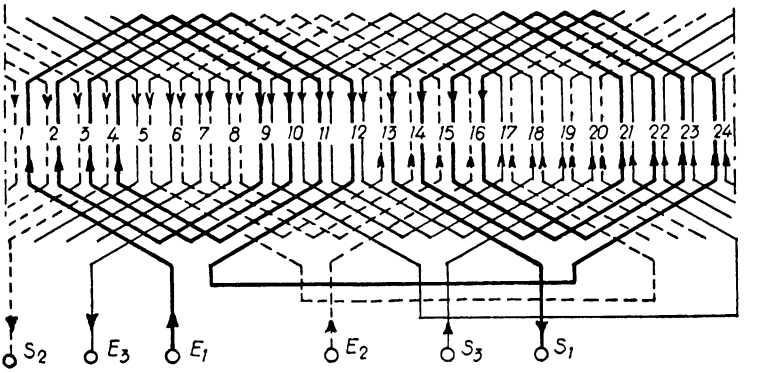


FIG. XII-48. — Bobinage imbriqué d'un stator triphasé, 24 encoches, 2 pôles, 2 faisceaux par encoche, pas raccourci de 66,6 % (0 à 8), coefficient de bobinage $k_1 = 0{,}825$ seulement. On remarque sur le schéma que les flèches sont en opposition dans les faisceaux des encoches 1-2-3-4-13-14-15-16, d'où la faible valeur de k_1.

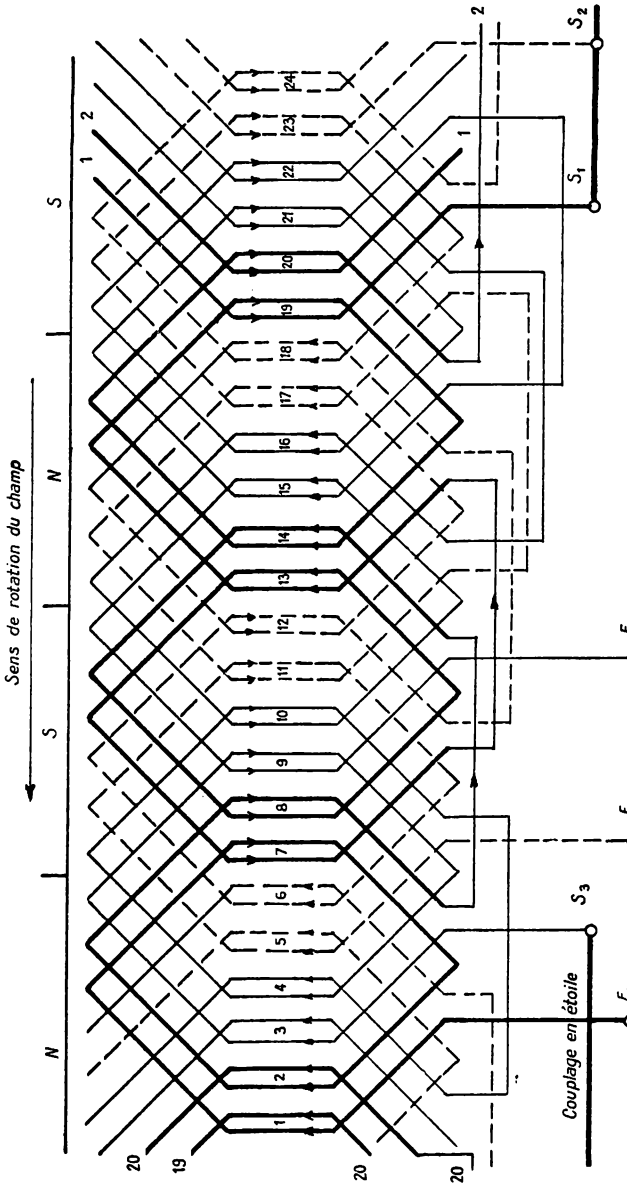


FIG. XII-49. — Enroulement imbriqué à pôles alternés d'un stator triphasé, 24 encoches; 4 pôles, 2 faisceaux par encoche, pas diamétral 1 à 7. **Deux ondes en série.** Couplage en étoile.

$$q = \frac{24}{4 \times 3} = 2 \text{ encoches par pôle et phase.}$$

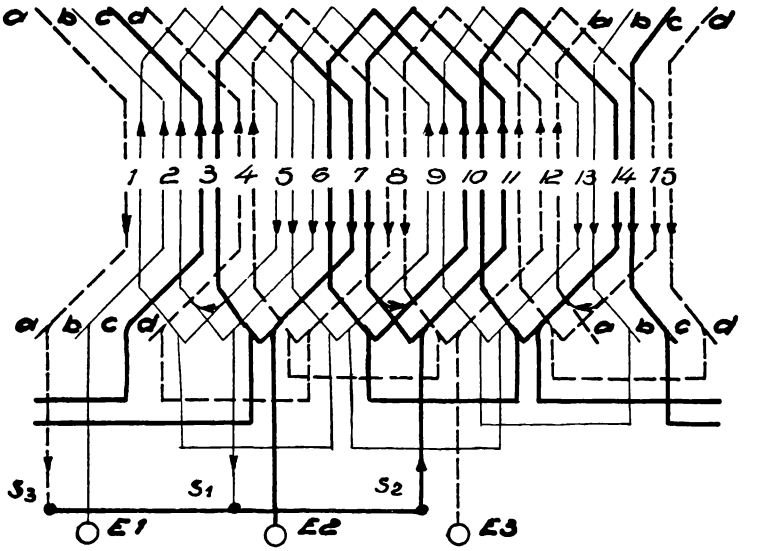


FIG. XII-50. — Schéma de bobinage d'un stator triphasé à bobines enchevêtrées, 2 faisceaux par encoche, 15 encoches, 4 pôles, sorties montées en étoile.

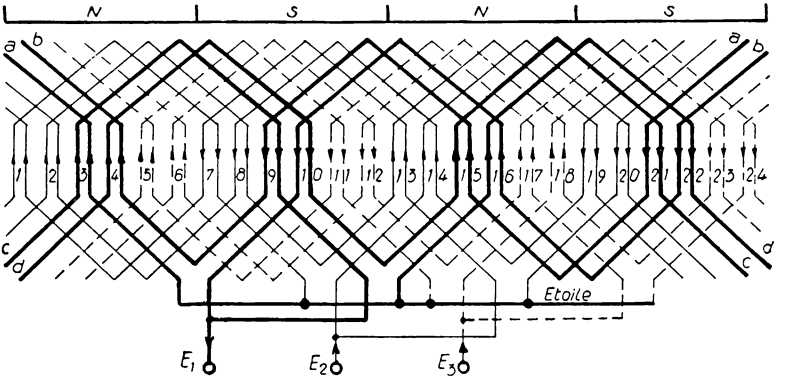


FIG. XII-51. — Schéma d'enroulement ondulé d'un stator triphasé 4 pôles, 24 encoches, 2 faisceaux par encoche, 2 ondes en parallèle.

$$q = \frac{24}{4 \times 3} = 2 \text{ encoches par pôle et par phase.}$$

Chacune des trois entrées se divise en deux pour parcourir la moitié des faisceaux d'une phase, soit 8 faisceaux. Les 6 sorties sont réunies pour former l'étoile.

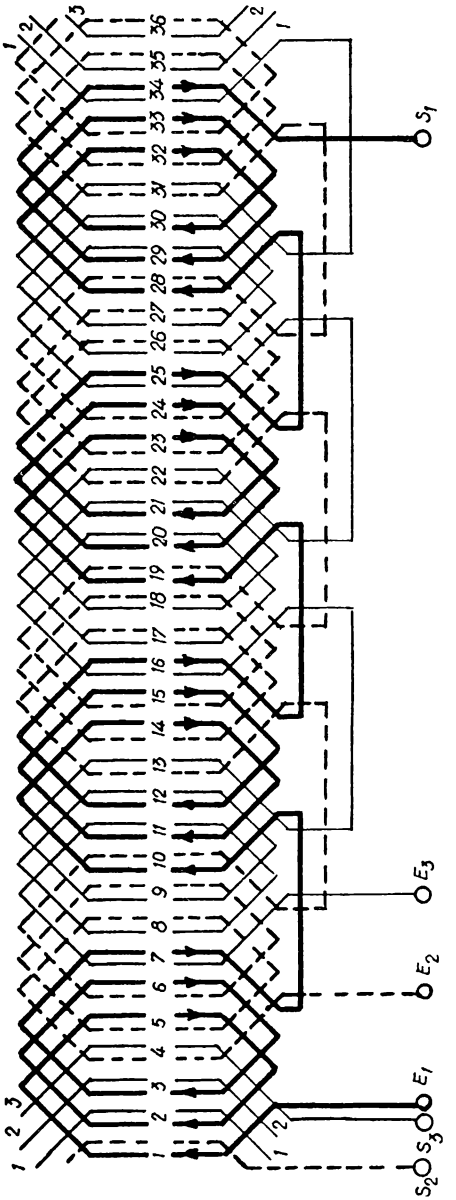


FIG. XII-52. — Stator triphasé, 36 encoches, 8 pôles, 2 faisceaux par encoche, pas de 1 à 5 encoches, 4 ondes en série.

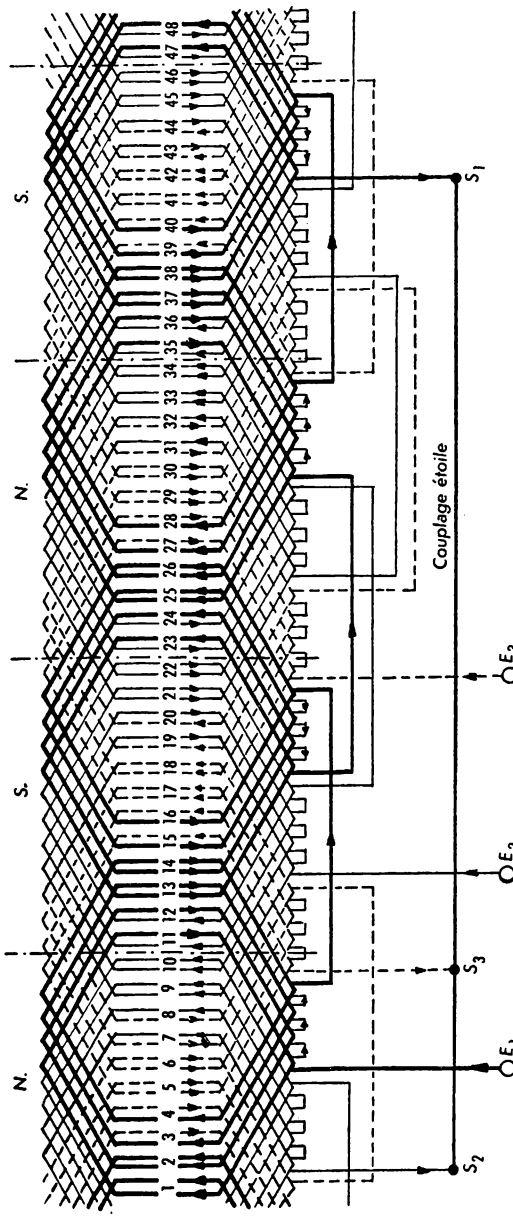


FIG. XII-53. — Schéma du bobinage d'un stator triphasé, 48 encoches, 2 faisceaux par encoche, 4 pôles, enroulement régulier à pas raccourci 1 à 11, 8 faisceaux par pôle et phase, couplage en étoile. On remarque que dans plusieurs encoches les faisceaux sont de phases différentes et de sens opposés. Les flèches ne tiennent pas compte des polarités, les entrées sont toutes du même sens. Choisi comme exercice. Les élèves inverseront le sens des flèches dans la phase 3, ce qui fera apparaître les pôles.

XII,9. BOBINAGE DES STATORS A DEUX POLARITÉS

Généralités.

La vitesse des moteurs asynchrones est fonction de la fréquence du courant du secteur et du nombre de pôles qu'ils possèdent.

Il résulte de ce qui précède qu'il est possible de faire varier la vitesse d'un moteur en modifiant le nombre de ses pôles.

Pour arriver à ce résultat, il suffit de pouvoir changer le couplage des bobines du stator, de façon à diminuer de

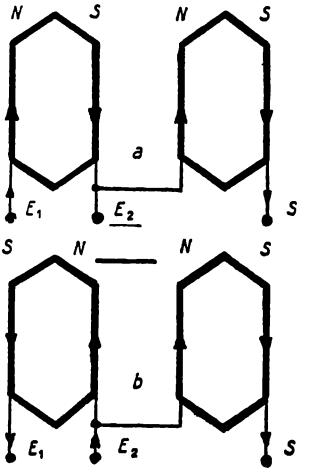


FIG. XII-54. — En modifiant judicieusement l'entrée du courant dans un bobinage, on peut changer le nombre de ses pôles, et par conséquent la vitesse de rotation du moteur.

Dans le schéma de principe ci-dessus, on obtient 4 pôles (en *a*) en branchant le réseau entre E_1 et S.

D'autre part, si on utilise la borne E_2 comme entrée (en *b*) et que l'on réunisse E_1 et S pour en faire une sortie, on réalise un 2 pôles, la vitesse du moteur sera doublée. C'est sur ce principe que sont basés les couplages des moteurs à deux vitesses du type « Dalhander et Lindström » dans lesquels $n = \frac{f}{p}$ tr/s, moins le glissement.

f est la fréquence du courant, p le nombre de paires de pôles. Les pôles sont indiqués par les flèches placées sur les faisceaux.

moitié, par exemple, le nombre des pôles, ce qui double la vitesse du moteur.

Le schéma simplifié de la *figure XII-54* montre comment on peut opérer pour passer d'un couplage en série des bobines à un couplage en parallèle, qui réduit de quatre à deux le nombre des pôles.

Pour rendre possibles ces deux couplages, il est nécessaire de sortir une prise du milieu du bobinage de chaque phase.

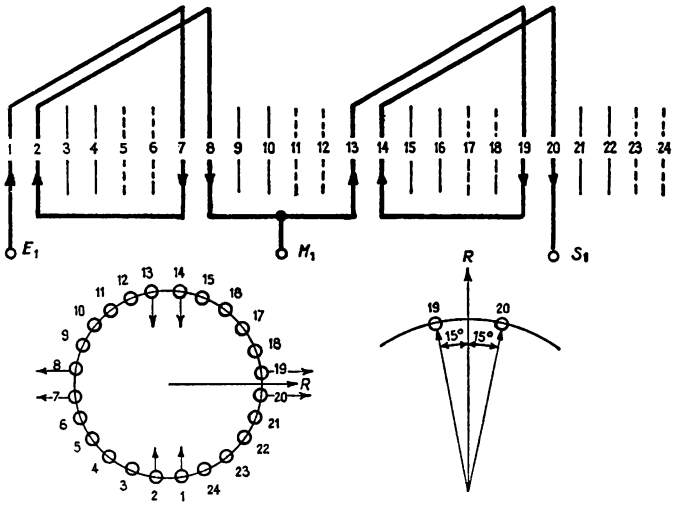


FIG. XII-55. — Schéma de principe du bobinage d'un stator « Dalhander et Lindström », 2/4 pôles triphasé, 24 encoches, pas 1 à 7.

Une seule phase est représentée; elle comporte une prise médiane M_1.

Si on relie E_1 et S_1 au réseau, on obtient un bobinage normal à 4 pôles indiqué par les flèches.

Chacun des pôles comprend 2 faisceaux par phase.

Le pas polaire d'un stator étant égal à 180° électriques, quel que soit le nombre de pôles de la machine, on a, pour un stator triphasé, 4 pôles, 24 encoches : $\frac{24}{4} = 6$ encoches par pôle, d'où un intervalle de $\frac{180}{6} = 30°$ électriques entre 2 encoches et un coefficient de bobinage $k_1 = \cos 15° = 0{,}966$.

Nota. — L'étude du coefficient de bobinage est traitée dans le chapitre des alternateurs.

ce qui donne neuf sorties sur la plaque à bornes. Ce nombre peut être ramené à six en faisant l'étoile sur le bobinage même.

Ces moteurs comportent des rotors bobinés d'une conception semblable à celle des stators, ce qui porte à six le

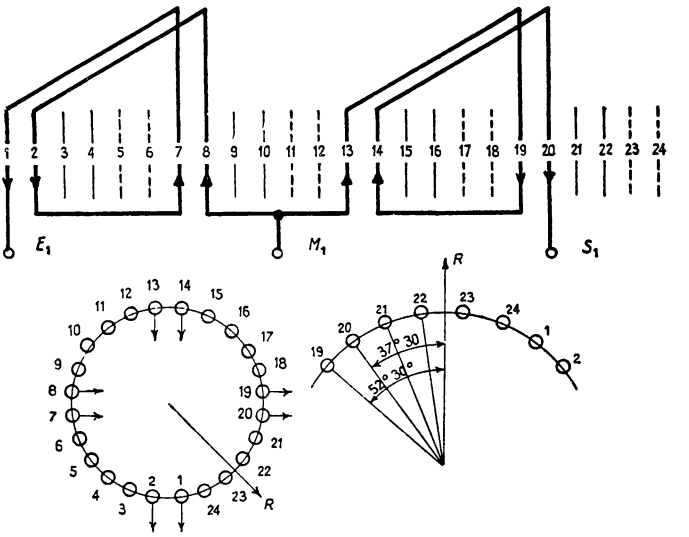


FIG. XII-56. — Le schéma est celui de la figure précédente, mais ici le réseau est relié d'une part à la prise médiane M_1 et, d'autre part, à E_1 et S_1 réunis sur une borne. On remarque en suivant les flèches que le courant s'est inversé dans les faisceaux placés à gauche de M_1, ce qui a pour résultat de transformer le bobinage 4 pôles en deux enroulements parallèles qui forment un 2 pôles, les encoches 7, 8, 13 et 14 constituant un pôle et les encoches 1, 2, 19 et 20 formant le deuxième pôle de la phase représentée.

Un coupleur spécial, ou un branchement judicieux sur la plaque à bornes, permet d'obtenir les deux combinaisons.

Le coefficient de bobinage $k_1 = 0{,}966$, obtenu pour la marche en 4 pôles, est ramené à :

cos 37°30'	0,793
cos 52°30'	0,609
	1,402

D'où $k_1 = 1{,}402 : 2 = 0{,}701$ pour la marche en bipolaire, mais la vitesse est doublée.

nombre des bagues. L'étoile se réalise sur l'induit avec les trois sorties, comme pour un rotor ordinaire.

Les rotors à cage normaux peuvent également être utilisés avec ces stators, ce qui simplifie l'appareillage de mise en marche.

9,1. Moteurs à deux vitesses et un seul bobinage

Les bobinages du type « Dalhander et Lindström » donnent des rapports de vitesse de l'ordre de 1 à 2.

Exemples : 2/4 pôles, 4/8 pôles, 6/12 pôles.

Pour obtenir ce résultat, on effectue un enroulement à pas diamétral et à pôles conséquents pour la petite vitesse (grande polarité); on le couple en bobinage à pôles alternés et pas raccourci pour obtenir la grande vitesse (petite polarité).

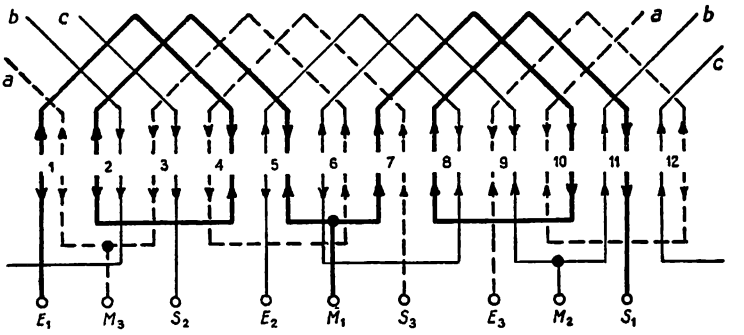


FIG. XII-57. — Schéma d'un bobinage « Dalhander et Lindström », 2/4 pôles, 12 encoches, 2 faisceaux par encoche.

Le pas des bobines a été choisi pour fonctionner normalement à la grande polarité (4 pôles conséquents), soit :

Un pas de $\frac{12}{4} = 3$ encoches (1 à 4 encoches).

Les flèches du haut donnent le sens du courant dans les faisceaux pour la marche en 4 pôles ($k_1 = 0{,}865$), les flèches du bas pour la marche en 2 pôles ($k_1 = 0{,}683$).

A l'instant choisi sur le schéma, on constate que le sens du courant est inversé dans les faisceaux de 4 encoches pour la marche en 4 pôles, et dans 6 encoches pour la marche en 2 pôles.

Les entrées des phases seront choisies de façon qu'elles se trouvent à p fois 120° électriques l'une de l'autre, à la petite polarité.

En adoptant un pas diamétral pour l'enroulement des pôles conséquents (4 pôles) d'un stator triphasé comportant vingt-quatre encoches (*fig. XII-55*), on a un coefficient de bobinage $k_1 = 0{,}966$. Celui-ci est ramené aux environs de 0,701 lorsque le moteur fonctionne en deux pôles. (Voir *fig. XII-56*).

De ce qui précède, il résulte que la marche en quatre pôles est normale, mais qu'en deux pôles nous aurons une

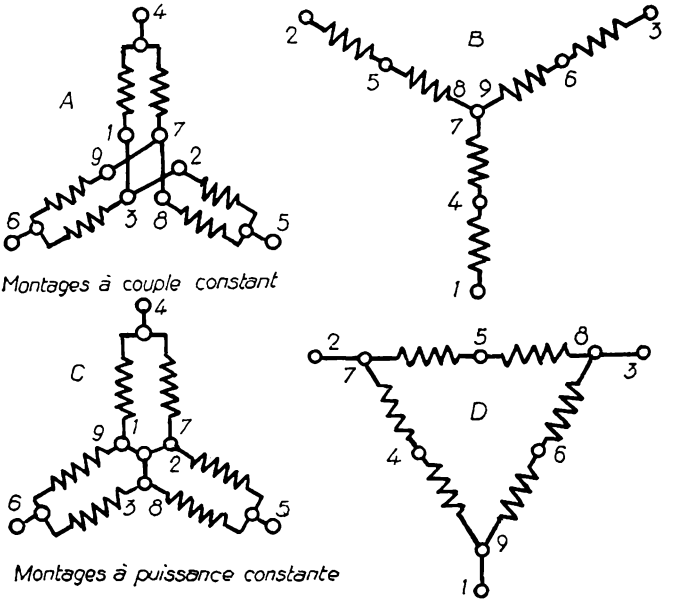


FIG. XII-58. — Représentation de 4 couplages utilisés pour les moteurs à 2 vitesses Dalhander et Lindström. A) Etoile-parallèle. B) Etoile-série. C) Etoile-parallèle. D) Triangle-série. Chaque phase comporte 2 ondes qui peuvent se grouper soit en série, soit en parallèle, grâce aux prises médianes. Les entrées E_1, E_2, E_3 portent les chiffres 1-2-3, les prises médianes les chiffres 4-5-6 et les sorties S_1, S_2, S_3, les chiffres 7-8-9. Les montages A et B s'utilisent pour les couplages à couple constant et les montages C et D pour les couplages à puissance constante.

mauvaise utilisation du moteur, due au raccourcissement du pas, et principalement au démarrage en raison du faible couple.

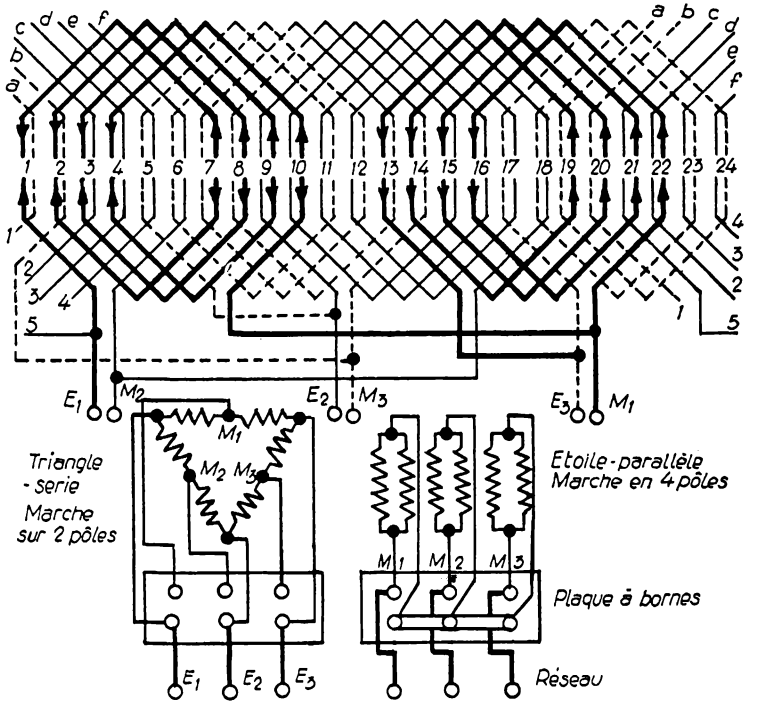

a b c d e f
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24
1 2 3 4 5
4 3 2 1 5
E1 M2 E2 M3 E3 M1
M1 M2 M3
Triangle - série
Marche sur 2 pôles
Etoile-parallèle
Marche en 4 pôles
M1 M2 M3
Plaque à bornes
E1 E2 E3
Réseau

FIG. XII-59. — Schéma d'enroulement d'un stator de moteur asynchrone triphasé à deux vitesses, 2/4 pôles, 24 encoches, 2 faisceaux par encoche, couplage à puissance constante.

Pour la marche en 2 pôles (grande vitesse), les bornes médianes M_1, M_2, M_3 sont libres sur la plaque à bornes ; le courant pénètre en E_1, E_2, E_3. En suivant la phase 1 sur le schéma (flèches du bas), on parcourt toute la phase pour sortie à E_3. Les encoches 1-2-3-4-19-20-21-22 forment un pôle, tandis que les encoches 7-8-9-10-13-14-15-16 forment le second pôle.

En marche étoile-parallèle, l'entrée se fait sur les bornes M_1, M_2, M_3. Les bornes E_1, E_2, E_3 forment l'étoile. En entrant par la phase 1 en M_1, le courant se partage en deux pour former 4 pôles, comme l'indiquent les flèches du haut des faisceaux.

En utilisant un bobinage à deux faisceaux par encoche, on constate que le couple de démarrage est sensiblement amélioré.

XII,10. COUPLE ET PUISSANCE DES MOTEURS A DEUX VITESSES

Selon le couplage adopté, on a un moteur :

— à puissance constante ;

— à couple constant.

C'est le couplage à puissance constante qui est le plus généralement utilisé.

10,1. Couplage à puissance constante

A la grande polarité (petite vitesse), le bobinage doit avoir un pas plus que diamétral, toujours connecté en triangle-série, de telle sorte que chaque côté du triangle soit constitué par deux bobinages en série.

A la petite polarité (grande vitesse), le pas est raccourci sensiblement de 50 %.

Le cas d'utilisation le plus fréquent est l'étoile-parallèle, dont les deux moitiés de l'enroulement de chaque phase sont toujours connectées en parallèle.

Avec un moteur 2/4 pôles couplé à puissance constante et à circuits magnétiques normaux, les puissances sont inférieures d'environ 45 % à celles des moteurs ordinaires considérées à chacune de leurs polarités, et elles sont entre elles sensiblement dans le rapport 2/3.

10,2. Montage à la plaque à bornes

La plaque à bornes des moteurs du type Dalhander et Lindström comporte six bornes, quoique le bobinage ait neuf sorties, dont trois prises médianes M_1, M_2, M_3.

L'enroulement des moteurs à puissance constante est couplé en triangle et ce sont les trois prises médianes et les trois sorties des sommets du triangle qui sont reliées à la plaque à bornes (*fig. XII-58*).

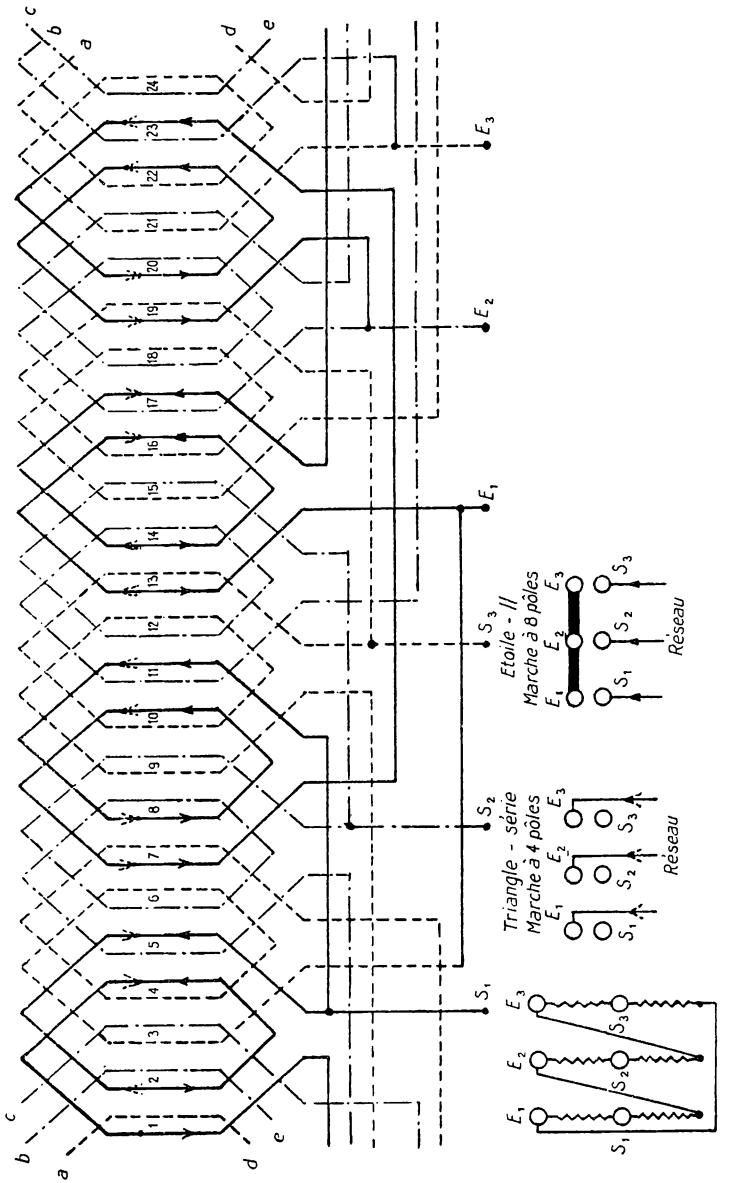


FIG. XII-60. — Schéma d'enroulement d'un stator de moteur asynchrone triphasé 4/8 pôles, à deux vitesses, comportant

Pour la marche en petite vitesse (triangle-série), on alimente le moteur par les trois sommets du triangle : E_1, E_2, E_3, les trois autres bornes M_1, M_2, M_3 restant libres.

Pour la marche en grande vitesse (étoile-parallèle), on court-circuite les trois sommets du triangle sur les bornes E_1, E_2, E_3, puis on branche la ligne du réseau sur les bornes M_1, M_2, M_3. Le couplage étoile-parallèle de la *figure XII-59* a été volontairement monté avec ses bobines côte à côte, mais en réalité il n'y avait rien à changer par rapport à la figure triangle-série, sauf l'entrée de la ligne qui se fait en M_1, M_2, M_3 et l'étoile sur les bornes du bas.

10,3. Couplage à couple constant

A la grande polarité (grand nombre de pôles), on réalise le couplage étoile-série.

A la petite polarité (petit nombre de pôles), on utilise le groupement étoile-parallèle.

Une étoile permanente est effectuée sur le bobinage. Elle est formée par la réunion des trois sorties S_1, S_2, S_3, ce qui limite à six le nombre des bornes sur la plaque du moteur : soit les entrées E_1, E_2, E_3 et les trois prises médianes M_1, M_2, M_3.

---

24 encoches, 2 faisceaux par encoche. Couplage à puissance constante.

Le pas du bobinage est égal à la moitié du pas normal d'un moteur à 4 pôles.

Ce schéma est également valable pour l'enroulement du rotor, qui doit comprendre 6 bagues.

Pour la marche à 4 pôles (triangle-série), on branche le réseau sur les entrées marquées E_1 — E_2 — E_3, et les sorties S_1 — S_2 et S_3 restent libres.

En partant de E_1 et en suivant la phase en trait plein, on parcourt 16 faisceaux pour aboutir à E_2. Le sens du courant, indiqué par les flèches en pointillé, donne bien 4 pôles pour cette phase.

Pour obtenir 8 pôles, on branche E_1 — E_2 — E_3 en étoile sur la plaque à bornes et on relie les bornes S_1 — S_2 et S_3 au réseau. Ce schéma est valable pour le rotor, il suffit de raccorder aux bagues 1-2-3, les entrées E_1, E_2, E_3 et aux bagues 4-5-6, les sorties S_1, S_2, S_3.

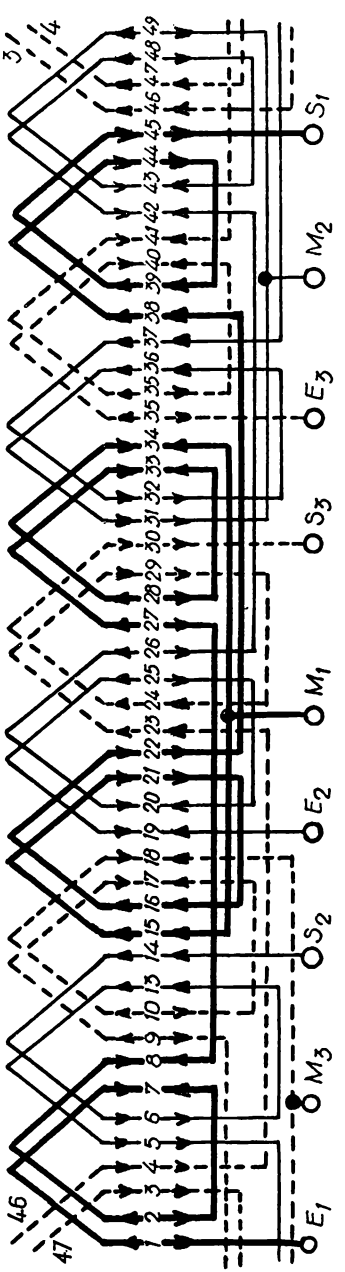


FIG. XII-61. — Stator triphasé à 2 vitesses (1 500 et 750 tr/mn), 4/8 pôles, 48 encoches, 1 faisceau par encoche, pas 1 à 7.

La marche en 8 pôles est rationnelle avec un coefficient de bobinage $k_1 = 0{,}966$ (flèches du haut). En 4 pôles, $k_1 = 0{,}701$ est faible, deux faisceaux sur douze formant un pôle ont un sens de courant inversé (flèches du bas).

Dans un moteur 4/8 pôles à couple constant, la puissance utile à 8 pôles est celle du 4 pôles divisée par la valeur du rapport $\left(\frac{\text{Vitesse 4 pôles}}{\text{Vitesse 8 pôles}}\right)^3$, c'est-à-dire divisée par 8.

10,4. Montage à la plaque à bornes

A la grande polarité (étoile-série), il suffit de connecter les fils de la ligne aux trois entrées E_1, E_2, E_3, en laissant libres les trois prises médianes. (Exercez-vous à faire cette figure en vous inspirant des figures *XII*-57 et *XII*-58).

A la petite polarité (étoile-parallèle), on connecte la ligne du réseau aux bornes M_1, M_2, M_3 et on court-circuite les bornes E_1, E_2, E_3 au moyen de barrettes pour former une seconde étoile.

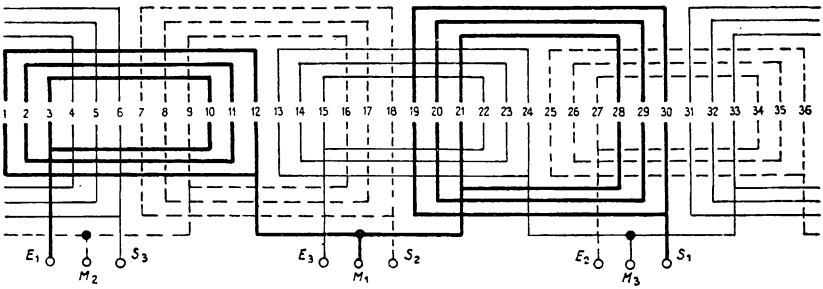


FIG. XII-62. — Enroulement, avec bobines concentriques sur deux plans, d'un moteur asynchrone triphasé destiné à fonctionner sur deux vitesses. Le stator comporte 36 encoches et le pas des bobines a été choisi au pas normal d'un enroulement à 4 pôles. A la petite polarité (2 pôles), les bobines n'embrassent qu'un demi-pas polaire.

XII,11. MOTEURS A DEUX BOBINAGES DISTINCTS

Généralités.

Les diverses polarités du stator d'un moteur peuvent être obtenues en faisant deux bobinages séparés.

Quand on désire un rapport de vitesse différent du simple au double, on réalise, sur le stator, ***deux bobinages distincts,*** à un ou deux faisceaux par encoche.

Pour éviter un bobinage trop volumineux et encombrant, on réalise généralement l'enroulement à petite polarité avec un pas raccourci qui réduit la masse des têtes des bobines.

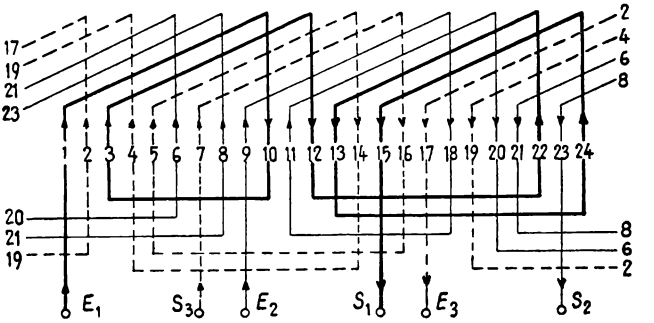


FIG. XII-63. — Schéma du bobinage bipolaire 24 encoches d'un stator de moteur asynchrone triphasé à deux vitesses et deux bobinages (2 et 6 pôles). Le pas est très raccourci, 1 à 10, pour faciliter le logement des têtes de bobines.

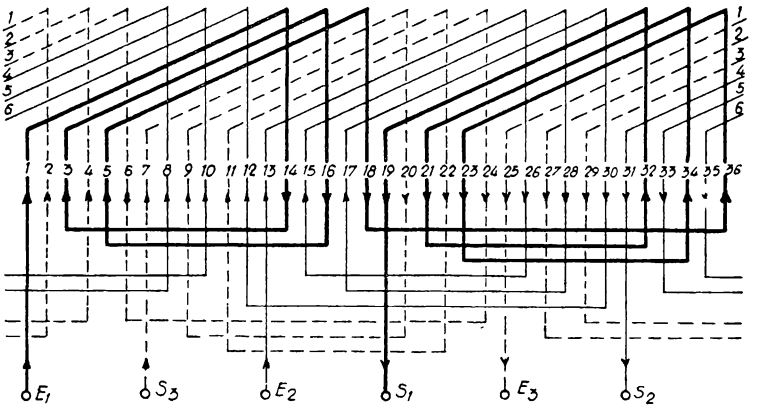


FIG. XII-64. — Bobinage bipolaire spécial d'un stator de moteur asynchrone triphasé à deux vitesses (2 et 6 pôles), comportant 36 encoches. Le pas est très raccourci (1 à 14) pour permettre le logement des têtes de bobines, qui sont recouvertes par celles du bobinage à 6 pôles.

Exécution.

Pour exécuter le bobinage du stator, on commence par la petite polarité, puis on recouvre celle-ci par la grande.

Ce dispositif d'enroulement permet d'obtenir une grande variété dans la gamme des vitesses en construisant, par exemple, des moteurs 2/6 pôles ou 2/8 pôles, etc...

On réalise également des moteurs à trois vitesses en exécutant un enroulement Dalhander doublé d'un bobinage classique. Les faisceaux de ce dernier sont logés dans les encoches utilisées pour l'enroulement Dalhander, qui ont été prévues en conséquence.

Les moteurs à deux vitesses comportant deux bobinages distincts ont une plaque à bornes sans barrettes. Le couplage est fait directement sur chaque bobinage. Trois bornes de la plaque se relient au réseau et servent pour une vitesse, les trois autres sont utilisées pour l'autre vitesse. Ce procédé permet l'usage de contacteurs spéciaux.

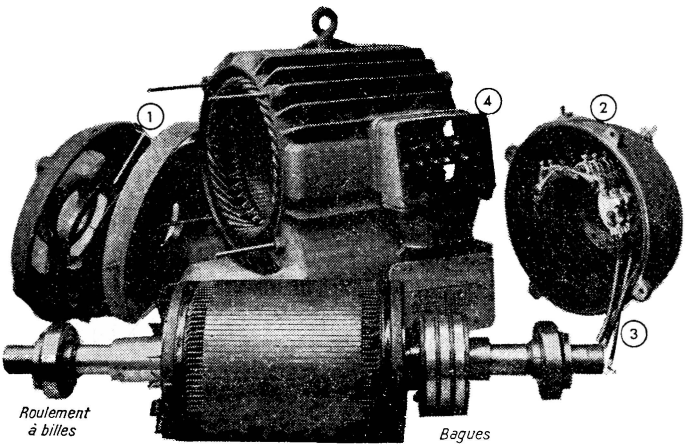


FIG. XII-65. — Moteur asynchrone triphasé à rotor bobiné. La carcasse est du type à ailettes de refroidissement, avec ventilateur (1). Dans le flasque droit (2) on remarque les deux lignes de balais et les câbles (3) servant de connexions avec le rhéostat de démarrage. (4) boîte à bornes.

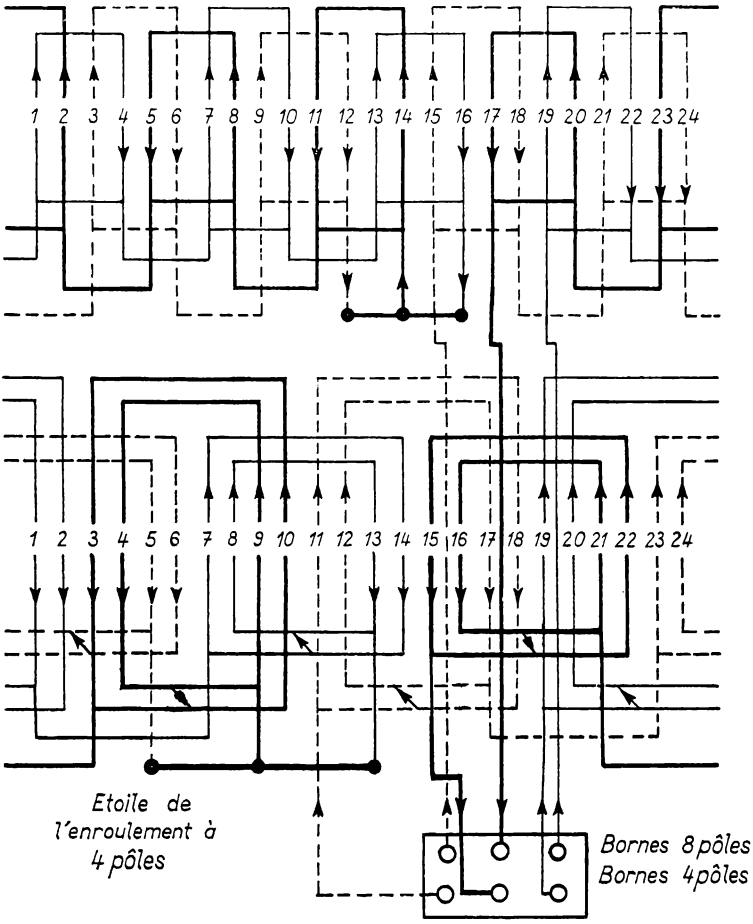


FIG. XII-66. — Schéma de bobinage d'un moteur triphasé à 2 vitesses, à deux enroulements distincts, 4/8 pôles, à 24 encoches, avec 2 faisceaux par encoche (un pour chaque enroulement). Couplage en étoile, ce qui permet de réduire à 3 le nombre des bornes d'entrée par bobinage (sur la plaque à bornes).

CHAPITRE XIII

RÉALISATION DU BOBINAGE DES STATORS DE MOTEURS ASYNCHRONES

XIII,1. CONDUCTEURS ET ENCOCHES

Généralités.

Le bobinage avec fil rond peut être employé jusqu'à une puissance de 150 kW, en utilisant le couplage en deux ou plusieurs circuits parallèles lorsque la section du fil devient par trop importante.

Les encoches sont du type semi-fermé, avec une ouverture suffisante pour donner passage aux fils égrenés.

Au-dessus de cette puissance, les encoches sont ouvertes et le bobinage s'effectue alors en utilisant des barres de cuivre méplat ou des bobines gabariées constituées par des spires de fil rond.

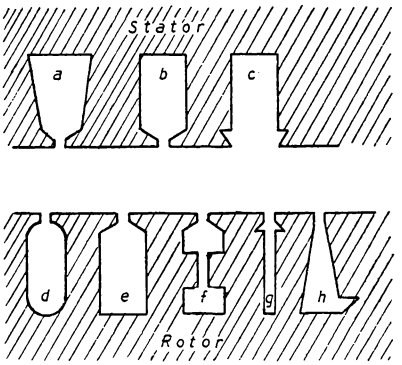


FIG. XIII-1. — Quelques profils d'encoches de stators et de rotors de moteurs à courant alternatif.

L'encoche *f* est utilisée pour des rotors de moteurs à double cage d'écureuil. *g* et *h* sont des encoches profondes; elles sont destinées à recevoir de l'aluminium sous pression.

Avant d'être placées, ces sections sont capotées dans la partie qui sera logée dans l'encoche et enrubannées sur le reste du parcours.

XIII,2. BOBINAGE AVEC FIL ÉGRENÉ ET BOBINES ENCHEVÊTRÉES

Cet enroulement comporte un faisceau par encoche, ramenant ainsi le nombre des bobines à la moitié du nombre des encoches.

Les bobines sont formées sur un gabarit en bois qui leur donne un profil approprié, afin de réaliser un bobinage dit « enchevêtré », du fait que les faisceaux se croisent alternativement à la sortie des encoches.

Les constructeurs ont adopté deux types de bobines pour effectuer cet enroulement : les bobines coudées et les bobines plates multiples.

Les bobines coudées.

Elles ont des faisceaux de longueurs différentes. Le faisceau court est en outre coudé afin de dégager l'entrée de l'encoche voisine qui doit recevoir le faisceau long, dont la sortie se croise sur le faisceau coudé (*fig. XIII*-3).

Les bobines plates multiples.

Elles comprennent toutes les bobines destinées à une phase. Elles sont enroulées sur un gabarit qui comporte autant de logements qu'il est nécessaire (*fig. XIII*-4).

Ce procédé a l'avantage de supprimer les soudures entre bobines d'une même phase, mais, par contre, il nécessite une certaine adresse de la part du bobineur qui doit former ses bobines à la sortie des rainures (*fig. XIII*-5).

A la mise en place de ces bobines, il faut les retourner alternativement afin de changer les entrées.

Le pliage des bobines s'effectue au moyen d'un corps tendre tel que le bois et la fibre rouge, que l'on place judicieusement sur la bobine à former et sur lequel on frappe avec un marteau, jusqu'à l'obtention du résultat recherché.

Ce procédé convient particulièrement pour les moteurs de quelques kW, dont le fil est de petite section.

Isolement de l'induit.

Avant de commencer un bobinage, on place dans les encoches un isolant qui prend le nom de « capote ». Les capotes sont généralement constituées par un carton lustré (presspahn), ou du leathéroïd renforcé d'une toile imprégnée, qui dépasse de 1 cm environ de chaque côté de la couronne magnétique.

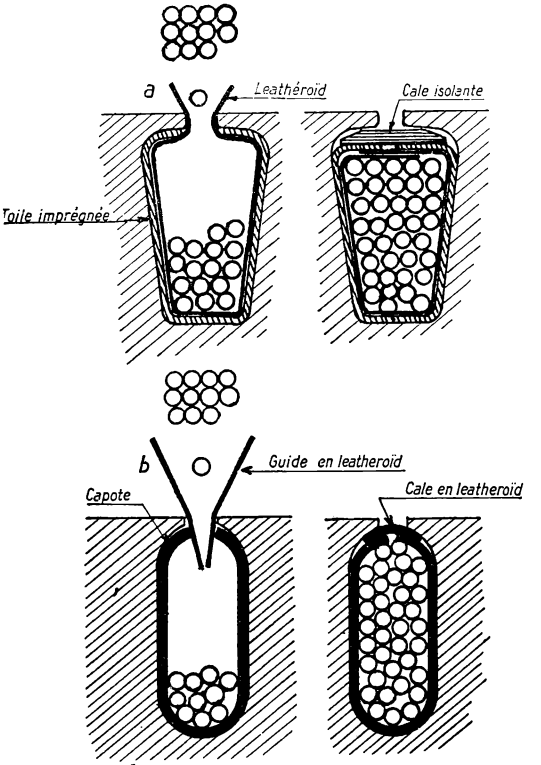


FIG. XIII-2. — *a*) Égrenage des conducteurs dans une encoche et vue d'une encoche garnie, isolée et calée.

b) Deux feuilles de leathéroïd mince « gouttière » servent de guide pour la mise en place des conducteurs. La capote est constituée par une feuille de leathéroïd de 0,2 à 0,3 mm repliée sur elle-même, qui contient une toile diagonale vernie de 0,15 mm d'épaisseur, la capote déborde des encoches de 1 cm environ.

D'autre part, pour faciliter le passage des fils à égrener dans l'encoche, on prévoit un débordement de la capote, comme l'indique la *figure XIII-2*, ou deux rectangles en leathéroïd comme guide-fil.

Calage des faisceaux.

Lorsque le faisceau est en place, on coupe l'isolant à sa hauteur normale et on replie les bords dans l'encoche sur les fils. La capote a ainsi la forme d'un tube.

Pour maintenir le tout en place, on introduit une cale en leathéroïd ou en bois sur la capote repliée. La mise

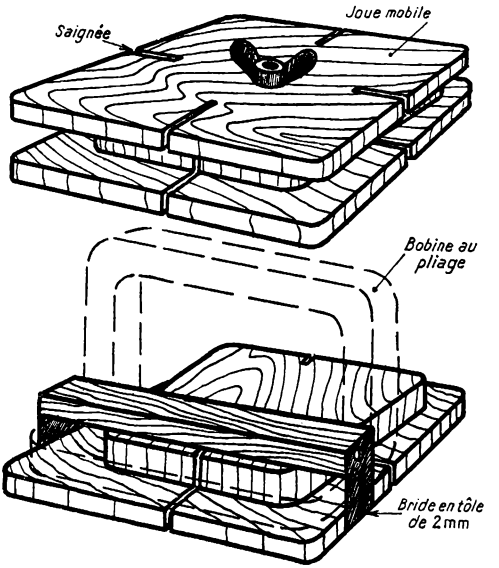


FIG. XIII-3. — Gabarit de formation pour bobines coudées. Il se compose d'une planchette dont l'épaisseur a la largeur de l'encoche et les côtés les dimensions intérieures de la bobine. Une joue fixe vissée à cette planchette et une joue mobile complètent le gabarit qui est assemblé au moyen d'un boulon. Des saignées, pratiquées dans les joues, permettent de passer une ficelle pour maintenir les spires en place au démoulage de la bobine.

Avant d'opérer le démoulage, il faut couder la bobine. Pour cela, on retire la joue mobile et on place sur le gabarit un collier formé d'un carrelet en hêtre et d'une bride en tôle (Le carrelet est arrondi sur l'angle de pliage). Pour effectuer le pliage, on relève à la main la bobine du côté libre, après avoir placé le collier à l'endroit exact où doit se faire le pliage.

en place de cette cale est facilitée par l'emploi d'un outil que l'on introduit entre la capote et l'ouverture de l'encoche afin de faire pression sur les conducteurs du faisceau.

La mise en place des cales peut s'exécuter au fur et à mesure du placement des faisceaux ou après leur mise en place.

XIII,3. BOBINAGE DES SECTIONS GROUPÉES

1° Avec des bobines coudées.

Lorsqu'on utilise des bobines coudées, l'enroulement s'effectue en égrenant les fils du faisceau, côté coudé, dans une première encoche, puis l'on saute une rainure et l'on égrène le faisceau côté coudé d'une deuxième bobine. puis d'un troisième, etc., jusqu'au moment où l'on a atteint le pas de la bobine. Dès lors, il est possible de rabattre les faisceaux longs dans les encoches chaque fois que l'on a placé un faisceau coudé.

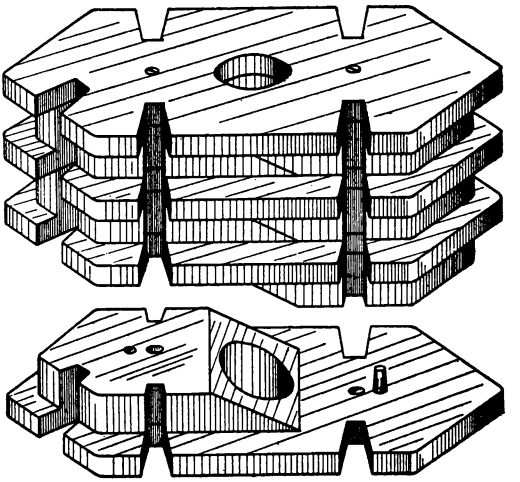


FIG. XIII-4. — Gabarit en bois pour la confection de 3 bobines groupées, plates. Le gabarit comporte 4 éléments démontables. Les 3 bobines sont enroulées sans coupure, ce qui supprime les soudures entre bobines d'une même phase. Les saignées permettent de passer le fil d'une bobine à l'autre et d'attacher ces dernières avant le démoulage.

2° Avec des bobines plates groupées.

Lorsqu'on utilise des bobines plates groupées pour l'enroulement d'un stator triphasé, on a trois groupes de bobines qui constituent chacun une phase.

En admettant qu'il s'agisse d'un stator quatre pôles, à deux encoches par pôle et par phase, cela nous donne $2 \times 4 = 8$ faisceaux par phase et $8 \times 3 = 24$ encoches pour le stator. Chacune des phases sera constituée par quatre bobines préparées sur un gabarit du type de la *figure XIII-4*.

Le bobineur commence par placer un faisceau du premier groupe, puis un faisceau du deuxième groupe, et enfin un du troisième avant de reprendre la deuxième bobine du premier groupe (*fig. XII-18*).

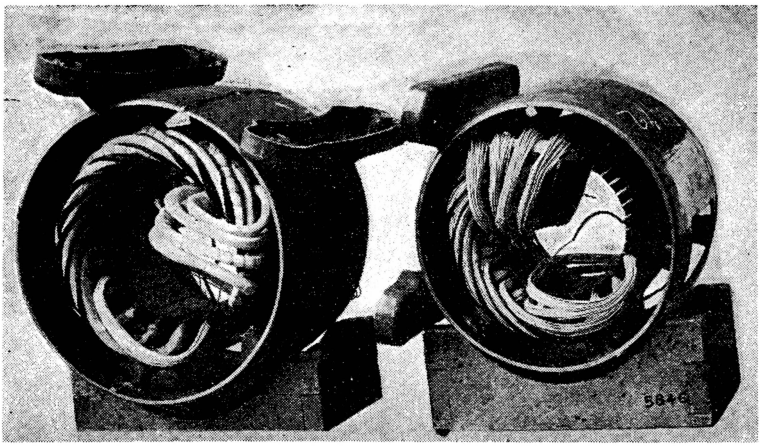


FIG. XIII-5. — Bobinage de deux stators de moteurs asynchrones triphasés, au moyen de sections plates que le bobineur égrène dans les encoches.

Celui de gauche a ses têtes de bobines enrubannées et séparées les unes des autres par une toile vernie épaisse.

Celui de droite sera livré sans enrubannage, mais ses bobines sont également isolées les unes des autres.

Les faisceaux des premières bobines qui ont été mises en place sont relevés afin de permettre le logement des derniers faisceaux coudés. Ils seront ensuite rabattus sur les faisceaux coudés préalablement par le bobineur.

Ces faisceaux se placent en laissant chaque fois une encoche libre entre eux, comme pour les sections coudées.

Après avoir égrené le quatrième faisceau, on peut introduire le faisceau court dans la première rainure laissée libre et continuer ainsi jusqu'au complet remplissage des encoches.

Les premiers faisceaux courts sont maintenus relevés jusqu'à la mise en place des derniers faisceaux coudés, puis on les rabat sur ceux-ci. (Voir *fig. XIII-5*).

Certains constructeurs enrubannent les têtes de bobines au fur et à mesure de leur mise en place et les isolent entre elles au moyen d'un diélectrique. Cette dernière précaution doit être exécutée avec soin en raison du voisinage de bobines de phases différentes.

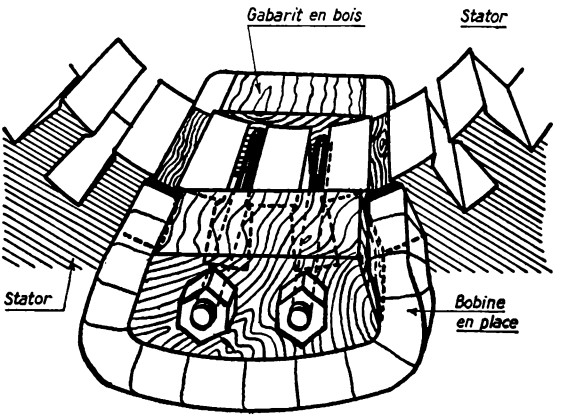


FIG. XIII-6. — Gabarit de bobinage deux pièces (en bois) permettant de former les bobines concentriques à fils passés.

Des boulons introduits dans les encoches maintiennent solidement les deux cales qui seront ajustées pour donner la forme désirée aux têtes de bobines.

La figure représente la bobine du premier plan enrubannée et calée : en réalité, elle le sera après l'enlèvement du gabarit.

XIII,4. BOBINAGE A FILS EN PARALLÈLE

Quand l'ouverture de l'encoche est trop étroite pour donner passage au fil, on choisit une section de fil de moitié plus petite. L'enroulement est alors constitué par deux

fils en parallèle, ce qui double le nombre des conducteurs dans les encoches.

L'isolant réparti sur deux conducteurs occupe une plus grande place.

Les sections de ce genre sont formées en enroulant ensemble les deux fils, s'ils sont au nombre de deux, ou les trois fils s'il est nécessaire d'en avoir trois.

Ce bobinage est appelé « à deux mains » et « à trois mains ».

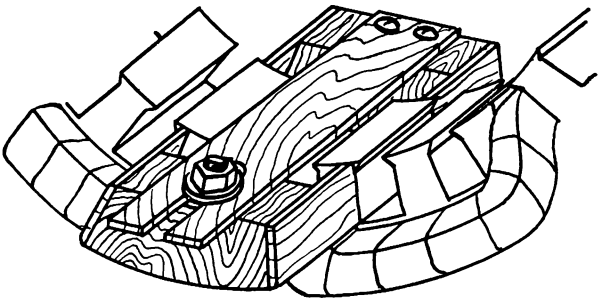


FIG. XIII-7. — Gabarit de bobinage en deux pièces réglables.
Ce gabarit permet la réalisation du deuxième plan des bobines à fils passés. Les bobines qui sont en place forment le premier plan; celles du deuxième plan utiliseront les encoches disposées de chaque côté du gabarit, elles coifferont les deux bobines du premier plan en passant sous l'extrémité du gabarit.

XIII,5. BOBINAGE CONCENTRIQUE AVEC FILS PASSÉS

Ce bobinage s'effectue sans sections gabariées. Le bobineur fixe, de part et d'autre de la couronne du stator, des cales ou gabarits, sur lesquels il aligne, spire par spire, son bobinage, en passant le fil par la fente des encoches.

Le fil est déroulé directement du rouleau au fur et à mesure de la confection des bobines.

Les gabarits doivent être conçus en plusieurs pièces, de façon à pouvoir être retirés après l'enroulement (*fig. XIII-6* et *XIII-7*).

Ce procédé donne des bobines concentriques relevées de chaque côté de la couronne du stator. Il est moins

employé que l'enroulement avec bobines gabariées, en raison de la durée d'exécution et de l'allongement que nécessitent les têtes de bobines.

XIII,6. BOBINAGE AVEC BARRES

Utilisation et réalisation.

Le bobinage avec barres de cuivre est utilisé pour les induits de dynamos à courant continu, pour les rotors des moteurs asynchrones et pour les stators d'alternateurs qui sont très particuliers, vu leur dimension.

Le bobinage à barres des dynamos se fait à encoches ouvertes. Les faisceaux sont constitués par paquets de plusieurs barres (2 à 6), isolées les unes des autres par du papier ou du ruban jaconas. Les parties obliques sont recouvertes d'un enrubannage en jaconas ou en tresse vernie. La partie droite, logée dans l'encoche, est capotée dans la plupart des cas.

S'il s'agit de courant continu, les faisceaux sont placés dans des encoches ouvertes. Quand ils entrent difficilement, on les insère en frappant sur une cale en bois placée sur le faisceau.

Les induits à barres sont frettés, même sur la partie fer.

Le bobinage à barres des rotors des moteurs asynchrones est logé dans des encoches fermées. Les faisceaux sont mis en place par enfilade. Les barres ne sont pliées que d'un seul côté. La deuxième partie oblique sera formée sur le rotor même. Pour cela, on utilise quelquefois un petit fer U de longueur et de profil appropriés, légèrement cintrés pour épouser la forme cylindrique du rotor.

Disposition des barres.

L'enroulement à barres se fait sur deux plans. L'un est constitué par les faisceaux inférieurs, les premiers placés; l'autre, par les faisceaux supérieurs.

Ces deux plans sont séparés, dans le fer, par une lamelle de presspahn et, dans les parties obliques, par une bande de presspahn maintenue en place par une frette de ruban jaconas.

Les deux plans de barres sont reliés entre eux au moyen de douilles soudées assemblant chaque barre inférieure à chaque barre supérieure. Cet assemblage nécessite beaucoup d'attention au départ car la première connexion décide de l'exactitude du bobinage, qui doit être conforme au schéma.

Les faisceaux de barres sont formés sur des gabarits, comme il est indiqué *fig. VIII-5*.

Les barres supérieures ont des parties obliques plus longues que celles du plan inférieur. En effet, le diamètre moyen de ce plan est inférieur à celui des barres supérieures qui reposent sur lui.

XIII,7. ISOLEMENT DES ENCOCHES DES STATORS ET DES ROTORS

Les tôles encochées qui constituent le circuit magnétique doivent être soigneusement isolées des conducteurs afin d'éviter la mise à la masse du bobinage.

Pour réaliser cet isolement, on introduit, dans les encoches, des « capotes » qui sont généralement fabriquées au moyen d'une feuille de leathéroïd ou de presspahn doublée d'une toile huilée appelée « diagonale » (*fig. XIII-2*).

S'il s'agit d'un moteur isolé à la classe A (papier, coton), la température du bobinage ne doit pas dépasser 50°C, prise au thermomètre, et 60°C si elle est calculée au moyen de la formule :

$$t_2 = \frac{R_2}{R_1}(234{,}5 + t_1) - 234{,}5^{\circ}\text{C}.$$

R_1 est la résistance du bobinage avant la mise en marche du moteur et R_2 est la nouvelle résistance après la mise en charge normale du moteur durant un certain temps. t_1 est la température ambiante et t_2 la température à chaud du bobinage.

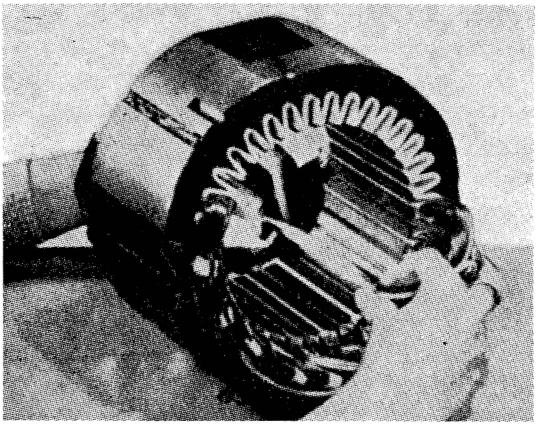


FIG. XIII-8. — Disposition des capotes dans un petit stator en cours de bobinage. (Document I.C.I.).

7,1. Exemple de la composition d'une capote, pour moteur isolé à la classe A :

Un presspahn ou un leathéroïd de 0,2 mm;
Une toile diagonale de 0,15 mm;
Un presspahn de 0,2 mm.

En réalité, il n'y a qu'une feuille de leathéroïd qui fait retour sur elle-même et contient la toile. La capote doit déborder de part et d'autre de 1 cm environ des tôles du stator ou du rotor.

CHAPITRE XIV

ÉTUDE SIMPLIFIÉE DES BOBINAGES

XIV,1. CHANGEMENT DES CARACTÉRISTIQUES DU BOBINAGE D'UN STATOR

Il arrive que, pour des raisons spéciales, on soit tenu de changer certaines caractéristiques d'un moteur.

Ce changement peut être obtenu en modifiant le bobinage du stator, ce qui permet :

1° Une transposition où la tension seule change, alors que la puissance reste la même.

2° Une transposition où la tension reste la même et où la puissance change.

3° Une transposition à tension et puissance variables.

Ces transpositions s'effectuent toujours dans le même type de moteur, la même fréquence, la même polarité.

Trois cas se présentent :

XIV,2. TRANSPOSITION OU LA TENSION SEULE CHANGE ALORS QUE LA PUISSANCE RESTE LA MÊME

On a un moteur tel que :

N = nombre de conducteurs par encoche au stator;
P = puissance en kW;
R = résistance par phase du stator à 20°C;
D = diamètre du fil isolé.
d = diamètre du fil nu;

P_c = poids total des conducteurs du stator;
U = tension : 220/380 V;
I_1 = intensité dans le stator à 220 V . Δ;
I_2 = intensité dans le stator à 380 V . (en étoile).

On désire connaître les caractéristiques de ce moteur, à 115/200 V, à la même puissance P.

1° Si N' est le nouveau nombre de conducteurs par encoche, on a :

$$N' = N \times \frac{115}{220}$$

ou, ce qui revient au même :

$$N' = N \times \frac{200}{380}$$

(la transposition s'effectue donc proportionnellement au rapport des tensions de même couplage).

2° Si D' est le nouveau diamètre du fil isolé, on a :

$$D' = D\sqrt{\frac{N}{N'}}.$$

On trouve une certaine valeur de D', diamètre isolé, auquel correspond un diamètre de fil nu, soit d' qui est donné par les catalogues de fils usités, et qui varie suivant l'épaisseur de l'isolant employé (émail, coton, soie pour les faibles diamètres, etc...).

3° Si R' est la nouvelle résistance du stator, par phase, à 20 °C, on a :

$$R' = R \times \frac{N'}{N} \times \left(\frac{d}{d'}\right)^2.$$

En effet, la résistance est inversement proportionnelle aux sections, donc au carré du diamètre.

4° Si P' est le nouveau poids du fil nu du stator, on a :

$$P' = P \times \frac{N'}{N} \times \left(\frac{d'}{d}\right)^2.$$

En effet, le poids est proportionnel au nombre de conducteurs et aux sections.

5° Si I_1' est la nouvelle intensité dans le stator à la tension de 115 V, c'est-à-dire lors du couplage en triangle, on a :

$$I_1' = I_1 \times \left(\frac{\text{ancienne tension au couplage } \Delta}{\text{nouvelle tension au couplage } \Delta}\right) = I_1 \times \frac{220}{115} = \text{A.}$$

Il revient au même d'utiliser le couplage étoile en respectant les tensions dans ce couplage. On a aussi :

$$I_1' = I_1 \times \frac{380}{200} = \text{A.}$$

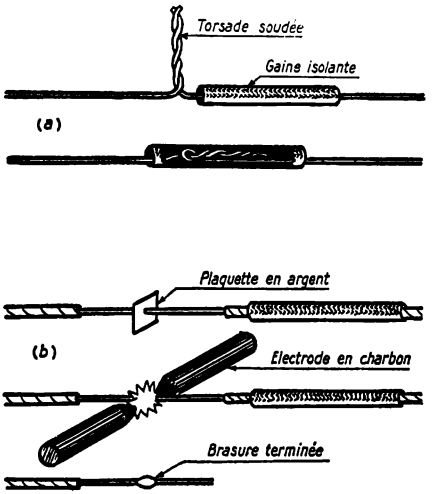


FIG. **XIV-1.** — Cette figure représente deux procédés de raccordement utilisés pour relier des conducteurs entre eux dans un bobinage.

a) Avec des fils de petite section (inférieure à 1,5 mm²), on décape à la toile émeri les extrémités des conducteurs, on les torsade sur 15 à 20 mm après avoir passé un bout de souplisseau de 4 cm, puis on soude à l'étain. Pour isoler la ligature, on glisse le souplisseau sur la torsade repliée.

b) Pour des sections de fils comprises entre 1,5 et 3 mm², on soude à l'arc les conducteurs placés bout à bout. Pour faciliter la soudure, on peut utiliser une mince plaquette d'argent (4/10 de mm d'épaisseur) et on décape à la poudre de borax. L'arc est alimenté au moyen d'un transformateur sous une tension comprise entre 12 et 24 V et 8 à 15 A, d'après la section des conducteurs.

6° Si I'_2 est la nouvelle intensité dans le stator, à 200 V on a :

$$I_2' = I_2 \times \frac{220}{115} = I_2 \times \frac{380}{200}$$

ou encore :

$$I_2' = \frac{I_1'}{\sqrt{3}}$$

Remarque. — Si on connaît le rendement η et le cosinus du moteur à 220/380 V, comme ils auront respectivement les mêmes valeurs à 115/200 V, on aura aussi :

$$I_1' = \frac{\text{Puissance utile en watts}}{\sqrt{3} \times 115 \times \eta \times \cos \varphi} \text{ et } I_2' = \frac{\text{Puissance utile en watts}}{\sqrt{3} \times 200 \times \eta \times \cos \varphi}.$$

2,1. Exemple de transposition à puissance constante et tension variable

Soit un moteur d'une certaine polarité, de puissance $P = 2{,}2$ kW, à la tension 220/380 V, ayant $N = 53$ conducteurs par encoche au stator, le fil ayant $D = 1{,}24$ mm de diamètre, isolement compris, et $d = 1{,}05$ mm de diamètre nu. Soit $R = 2{,}5\ \Omega$ la résistance par phase du stator à 20°C et $P_c = 2{,}900$ kg le poids total du fil du stator. Soit $I_1 = 8{,}7$ A, l'intensité au stator à 220 V et $I_2 = 5$ A, l'intensité au stator à 380 V.

On voudrait connaître les caractéristiques de ce moteur, à la même puissance de 2,2 kW, mais à 115/200 V.

On aura :

1° Nombre de conducteurs par encoche :

$$N' = N \times \frac{115}{220} = 53 \times \frac{115}{220} = 27{,}7 \text{ conducteurs/encoche,}$$

ou bien, ce qui revient au même :

$$N' = N \times \frac{200}{380} = 53 \times \frac{200}{380} = 27{,}9 \text{ conducteurs/encoche.}$$

On prendra donc : $N' = 28$ conducteurs par encoche.

2° Diamètre isolé du conducteur :

$$D' = D\sqrt{\frac{N}{N'}} = 1{,}24\sqrt{\frac{53}{28}} = 1{,}7 \text{ mm.}$$

On se reporte alors à la liste des conducteurs existants et on choisit le diamètre isolé se rapprochant le plus de 1,7 mm. On lit sur cette liste : 1,705 mm, auquel correspond un diamètre nu de $\varphi' = 1{,}5$ mm.

On a donc :

Diamètre nu du fil = 1,5 mm.

Diamètre isolé du fil = 1,705 mm (l'isolement étant une couche de coton par exemple).

Il est évident qu'on choisit le diamètre isolé dans la liste correspondant à l'isolement désiré.

3° Résistance à 20 °C d'une phase du stator :

$$R' = R \times \frac{N'}{N}\left(\frac{d}{d'}\right)^2 = 2{,}5 \times \frac{28}{53}\left(\frac{1{,}05}{1{,}5}\right)^2 = 0{,}648 \ \Omega.$$

4° Poids de fil total au stator :

$$P_c' = P_c \times \frac{N'}{N} \times \left(\frac{d'}{d}\right)^2 = 2{,}9 \times \frac{28}{53}\left(\frac{1{,}5}{1{,}05}\right)^2 = 3{,}120 \text{ kg.}$$

5° Intensités dans le stator :

à 115 V :

$$I_1' = I_1 \times \frac{220}{115} = 8{,}7 \times \frac{220}{115} = 8{,}7 \times \frac{380}{200} = 16{,}5 \text{ A.}$$

à 220 V :

$$I_2' = I_2 = \frac{220}{115} = 5 \times \frac{220}{115} = 5 \times \frac{380}{200} = 9{,}5 \text{ A.}$$

ou bien :

$$I_2' = \frac{I_1'}{\sqrt{3}} = \frac{16{,}5}{1{,}732} = 9{,}5 \text{ A.}$$

Généralités.

Ce genre de transposition ne peut se pratiquer indéfiniment, car, lorsqu'on part d'un moteur fonctionnant sous une tension élevée et qu'on désire les caractéristiques de ce moteur à une tension plus basse, il arrive un moment où le diamètre du fil augmente à tel point qu'il ne pénètre plus par l'ouverture de l'encoche, lors du bobinage et l'égrenage devient impossible.

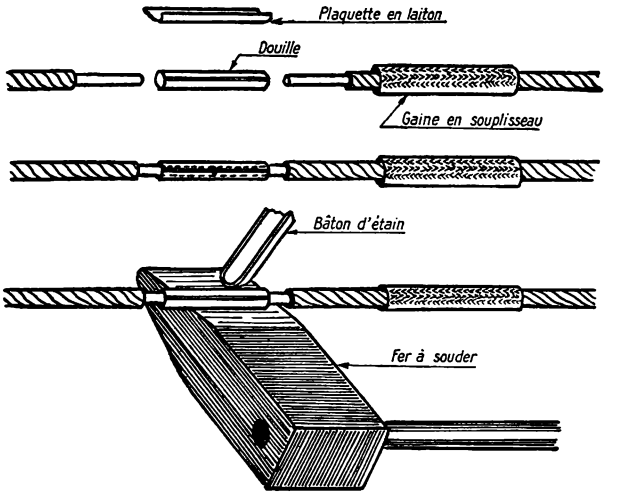


FIG. XIV-2. — A partir de 3 mm² de section, le raccordement des conducteurs de bobinage s'effectue au moyen d'une douille en cuivre ou en laiton étamé. On commence par passer une gaine en souplisseau sur l'un des conducteurs en cuivre, puis on étame les extrémités des fils avant de les passer dans la douille. Les conducteurs étant en place, on les soude à l'étain; puis on glisse le souplisseau qui doit déborder suffisamment de la douille pour recouvrir toute la partie désisolée des conducteurs.

Dans ce cas, on utilise non plus un seul conducteur ayant le diamètre isolé trouvé par le calcul, mais deux fils en parallèle ayant sensiblement pour somme de leurs sections isolées, la section isolée donnée par le calcul fait pour un seul conducteur isolé, selon la méthode précédente.

D'autre part, lorsqu'on passe d'une tension peu élevée, comme 115 V couplage triangle, à une tension élevée,

comme 500 V couplage triangle, il faut réduire le nouveau nombre de conducteurs trouvé par le calcul, d'environ 3 % à 5 % pour les moteurs de faible puissance et de polarité élevée.

2,2. Utilisation de tableaux pour les transpositions où seule la tension change

Lorsqu'on est amené à changer la tension de fonctionnement d'un moteur sans modifier sa vitesse et sa puissance, il est nécessaire de refaire le bobinage.

Dans ce cas, c'est le nombre et la section des conducteurs qu'il suffit de changer dans les encoches. ***Des tableaux permettent d'obtenir, par simple lecture, les nouvelles caractéristiques des sections de bobinage.***

Connaissant le nombre de conducteurs par encoche de l'ancien enroulement et la tension de fonctionnement du moteur, il suffit de lire (sur le tableau), en regard de la nouvelle tension adoptée, le nombre de conducteurs par encoche. Ce nombre est placé dans la même colonne que celui de l'ancien bobinage.

Exemple : On désire changer la tension de fonctionnement d'un moteur 127/220 V en 220/380 V. Le nombre de conducteurs par encoche en 127/220 V est de 30. On lit, à l'intersection de 30 et de 220/380 V, le nombre 52. Le nouvel enroulement devra donc comprendre 52 conducteurs par encoche (Tableau 2,3).

En ce qui concerne la section de ces conducteurs, on consultera le tableau comparatif des sections, dans lequel on trouve 1,13 mm² pour l'exemple précédent, sachant que la section des conducteurs utilisés sous 127/220 V est de 2 mm² (Tableau 2,5).

Pour cela, on lit la section connue des conducteurs en regard de 127/220 et on se reporte dans la même colonne en regard de 220/380, où on lit la nouvelle section.

Cette section varie comme le rapport des tensions triangulées entre elles, ou des tensions étoilées entre elles. (Il en est de même du nombre de conducteurs par encoche, qui varie comme le rapport des tensions de même couplage).

2,3. Tableau du nombre de conducteurs par encoche en fonction de la tension du réseau

Tension en volts	Nombre de conducteurs par encoche										
110/190	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
115/200	10	11	12	13	15	16	17	18	19	20	21
127 220	11	13	14	15	16	17	18	20	21	22	23
220/380	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38	40
380/658	34	38	41	45	48	52	55	59	62	66	69
Tensions en volts	**Nombre de conducteurs par encoche**										
110/190	21	22	23	24	25	26	27	38	29	30	31
115/200	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32
127/220	24	25	26	28	29	30	31	32	33	35	36
220/380	42	44	46	48	50	52	54	56	58	60	62
380/658	72	76	80	83	86	90	93	97	100	104	107
Tensions en volts	**Nombre de conducteurs par encoche**										
110/190	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42
115/200	33	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44
127/220	37	38	39	40	41	43	44	45	46	47	48
220/380	64	66	68	70	72	74	76	78	80	82	84
380/658	110	114	118	121	124	128	131	135	138	142	145

2,4. Section des conducteurs d'un stator de moteur asynchrone en fonction de la tension d'alimentation

Comme on l'a vu dans un tableau précédent en ce qui concerne le nombre des conducteurs, il est possible de donner, par un tableau, le rapport des sections des fils entre deux bobinages soumis à des tensions différentes.

Cette possibilité est particulièrement appréciable quand on procède au rebobinage d'un stator dans le but de changer sa tension d'alimentation (Tableau 2,5).

Le tableau est valable chaque fois qu'un moteur est rebobiné pour une même puissance, une même vitesse et une même fréquence.

2,5. Tableau comparatif des sections des conducteurs d'un stator en fonction de la tension d'alimentation

Tensions en volts	Section des conducteurs							
115/200 (diamètre)	0,73 (1)	0,99 (1,15)	1,49 (1,4)	2,15 (1,65)	2,52 (1,8)	2,92 (1,90)	3,80 (2,2)	5,97 (2,75)
127/220 (diamètre)	0,67 (0,9)	0,91 (1,1)	1,38 (1,3)	2,00 (1,6)	2,34 (1,7)	2,71 (1,85)	3,52 (2,1)	5,53 (2,65)
220/380 (diamètre)	0,38 (0,7)	0,52 (0,8)	0,78 (1)	1,13 (1,2)	1,33 (1,3)	1,54 (1,4)	2,00 (1,6)	3,14 (2)

2,6. Remarques concernant le tableau 2,5

Les diamètres indiqués dans le tableau sont les plus rapprochés des sections trouvées.

D'autre part, les sections des conducteurs étant en rapport direct avec les tensions d'utilisation, on peut toujours trouver la section à donner au fil d'un stator rebobiné pour une autre tension. Pour cela, il suffit de calculer le rapport entre les deux tensions (l'ancienne et la nouvelle envisagée).

Exemple : La section du fil d'un bobinage de stator fonctionnant sous 220/380 V est de 0,95 mm² et on désire rebobiner le stator en 115/200 V.

Le rapport entre les tensions est :

$$380 : 200 \text{ ou } 220 : 115 = 1{,}9.$$

La nouvelle section à utiliser pour fonctionner en 115/200 V sera de $0{,}95 \times 1{,}9 = 1{,}8$ mm² et le diamètre 1,5 mm.

XIV,3. TRANSPOSITION OU LA TENSION RESTE LA MÊME ET OU LA PUISSANCE CHANGE

Ces transpositions se font également dans le même type de moteur, à la même polarité et la même fréquence.

Si l'on a un moteur tel que :

N = nombre de conducteurs par encoche du stator;
P = puissance en kW;
R = résistance par phase stator à 20°C;
D = diamètre du fil isolé;
d = diamètre du fil nu;
P_c = poids des conducteurs du stator;
I_Δ = intensité au stator en couplage en Δ;
I_λ = intensité au stator en couplage en étoile

(si le moteur fonctionne à deux tensions, sinon on a une seule intensité et un seul couplage).

Si l'on désire les caractéristiques de ce moteur, à une autre puissance P', mais à la même tension (220 VΔ, par exemple), on a :

3,1. Nouveau nombre de conducteurs par encoches :

$$N' = N \sqrt{\frac{P}{P'}}.$$

Le diamètre du fil D', la résistance R à 20°C par phase stator, le poids de fil P_c', se calculent de la même façon que précédemment, c'est-à-dire avec les mêmes formules.

La nouvelle intensité dans le stator (couplage triangle) sera donnée par la relation :

$$I_\Delta' = I_\Delta \times \frac{P'}{P}.$$

Remarque. — Le cas de transposition se présente lorsqu'un moteur est soumis à un régime de fonctionnement anormal.

Exemple. — On a intérêt à désaturer un moteur lorsque celui-ci doit effectuer dans une heure un nombre de démarrages supérieur à celui pour lequel il a été défini. Il est évident qu'il faut choisir un moteur d'une puissance supérieure à celle désirée pour l'amener après désaturation à la puissance voulue.

Application. — On a un moteur :

Puissance P = 6 kW,
Tension = 220 V;
Nombre de conducteurs par encoche au stator : $N = 32$;
Diamètre de fil isolé : 1,81 mm;
Diamètre de fil nu : 1,6 mm;
Résistance à 20°C par phase stator : 0,805;
Poids de fil total au stator : 5,82 kg;
I pour 220 VΔ = 16,8 A.

On désire réduire la puissance de ce moteur à 5 kW sous 220 VΔ (même tension, même couplage).

Nouvelle puissance : 5 kW.

1° Le nouveau nombre de conducteurs par encoche du stator sera :

$$N' = N \sqrt{\frac{P}{P'}} = 32 \times \sqrt{\frac{6}{5}} = 35.$$

2° Le diamètre du fil isolé sera :

$$D' = D \sqrt{\frac{N}{N'}} = 1{,}81 \times \sqrt{\frac{32}{35}} = 1{,}72 \text{ mm}.$$

On lit sur la liste : D isolé = 1,705 mm auquel correspond un diamètre de 1,5 mm nu.

3° La résistance à 20 °C par phase stator sera :

$$R' = R \times \frac{N'}{N} \left(\frac{d}{d'}\right)^2 = 0{,}805 \times \frac{35}{32} \left(\frac{1{,}6}{1{,}5}\right)^2 = 1 \ \Omega.$$

4° Le poids du fil stator sera :

$$P' = P \times \frac{N'}{N} \left(\frac{d'}{d}\right)^2 = 5{,}82 \times \frac{35}{32} \left(\frac{1{,}5}{1{,}6}\right)^2 = 5{,}5 \text{ kg}.$$

5° L'intensité sous 220 V sera :

$$I'_{\Delta} = I_{\Delta} \times \frac{P'}{P} = 16{,}8 \times \frac{5}{6} = 14 \text{ A.}$$

XIV,4. TRANSPOSITION A TENSION VARIABLE ET A PUISSANCE VARIABLE

On effectue successivement deux transpositions : par exemple, on effectue d'abord le calcul des caractéristiques en changeant la tension, comme dans le premier cas; puis, avec ces nouvelles caractéristiques, on calcule la transposition à la nouvelle puissance qui donne les caractéristiques finales.

XIV,5. LE FACTEUR DE REMPLISSAGE D'ENCOCHE

Pour déterminer le nombre et la section des conducteurs qui doivent être logés dans les encoches d'une machine électrique, plusieurs critères doivent être connus :

— la forme des encoches et ses cotes,
— l'épaisseur de l'isolant de la capote de l'encoche,
— la section utile de l'encoche,
— la forme des conducteurs : fil rond ou barres,
— la section des conducteurs isolés.

De ces critères dépend le facteur de remplissage de l'encoche.

L'isolant de l'encoche, appelé « capote », a une épaisseur comprise entre 0,7 et 1 mm pour les machines fonctionnant jusqu'à 500 V.

Dans les stators ou rotors à 2 faisceaux par encoche, la hauteur de l'encoche doit être réduite de 1 mm, en raison de l'isolant qui est intercalé entre les 2 faisceaux.

La surface qui demeure réservée aux conducteurs est appelée ***« surface utile de l'encoche »***.

Les conducteurs occupent cette surface utile et, entre eux, il y a quelques vides. Ces vides tiennent une certaine place. Les conducteurs ne doivent pas être trop bourrés dans l'encoche, ce qui risque d'abîmer leur isolant lors du bobinage. Ils doivent occuper sensiblement la moitié de la surface utile de l'encoche.

Le rapport entre la place occupée par les conducteurs et la surface utile S de l'encoche est appelé ***« facteur de remplissage de l'encoche »***. Il est d'environ 0,6 et varie, selon les cas, de 0,5 à 0,7.

Calcul du facteur de remplissage a.

Il est donné par la formule :

$$a = \frac{N\left(\pi \times \frac{d^2}{4}\right)}{S}.$$

S étant la surface utile de l'encoche;
N étant le nombre de conducteurs par encoche;
d étant le diamètre isolé d'un conducteur;

$\frac{\pi\, d^2}{4}$ est la section isolée du conducteur.

Ainsi, dans l'exemple précédent, si la surface utile de l'encoche est 125 m², le facteur de remplissage de l'encoche est

$$a = \frac{28 \times 3{,}14 \times \left(\frac{1{,}705^2}{4}\right)}{125} = 0{,}51.$$

Variante pour le remplissage d'encoche.

Dans les cas où le diamètre des conducteurs devient important et où le nombre de conducteurs par encoche devient faible (moins d'une vingtaine), on dessine l'encoche à une échelle supérieure (10 par exemple). On dessine aussi ses couches d'isolant et sa cale. Puis, dans l'espace resté libre, on dessine des cercles de diamètre égal au diamètre

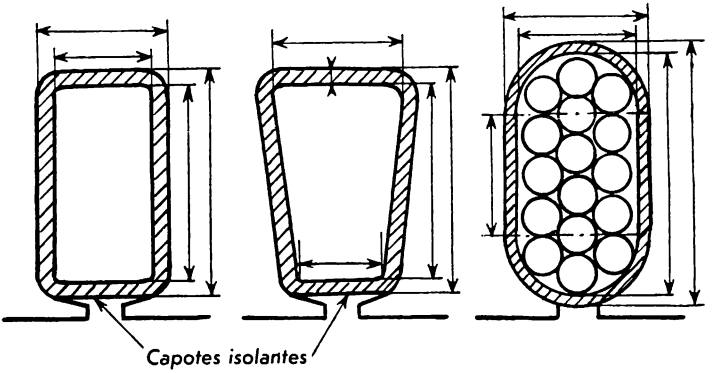


FIG. XIV-3. — Trois types d'encoches : (A) rectantulaire, (B) trapézoïdale, (C) rectangulaire semi-circulaire. Dans cette dernière, les conducteurs sont représentés en coupe sous forme de cercles.

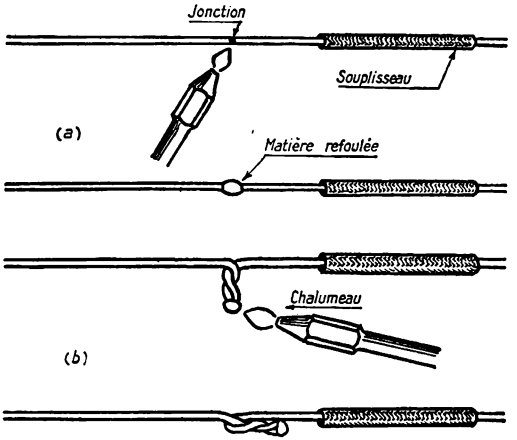


FIG. XIV-4. — La jonction des fils en aluminium peut s'effectuer :

a) soit par soudure autogène, avec refoulement des deux bouts de fil sur une longueur de 5 mm;

b) soit par soudure autogène, sur l'extrémité d'une double torsade, comme l'indique la figure.

Dans les deux cas, on emploie un très petit chalumeau et un flux de soudure « Alugène » ou « Neutralinox », destiné à dissoudre la couche d'oxyde au cours de la soudure. Un souplisseau passé sur le conducteur avant le soudage est ensuite glissé sur la jonction pour l'isoler.

isolé des conducteurs, ceci sans serrer ces cercles les uns contre les autres. On compte alors le nombre des cercles tracés et l'on obtient ainsi le nombre exact de conducteurs qu'on pourra mettre dans l'encoche. Dans ce cas, si l'on calculait le coefficient de remplissage, il atteindrait 0,6 et même un peu plus.

XIV,6. CALCULS SIMPLIFIÉS DU BOBINAGE DES STATORS DE MOTEURS ASYNCHRONES

Le calcul du bobinage des moteurs asynchrones, tel qu'il est pratiqué dans les bureaux de calculs, dépasse le cadre de cet ouvrage. Pourtant, il arrive qu'un bobineur soit tenu de reconstituer un enroulement en partant d'une carcasse vide ou d'un moteur grillé dont il doit changer les caractéristiques.

Les formules simples qui suivent permettront de rebobiner les stators hors d'usage.

Ne connaissant pas la section du fil à employer et par conséquent le nombre de conducteurs à placer par encoche, il est difficile d'exécuter le bobinage.

Si le stator a conservé sa plaque, elle sera d'un grand secours pour déterminer les facteurs inconnus. En effet, la plaque indique toujours : la puissance, la tension d'utilisation, l'intensité statorique et rotorique, le nombre de phases et la vitesse. Cette dernière révèle la polarité du moteur : 2 pôles pour 3 000 tr/mn, 4 pôles pour 1 500 tr/mn, etc. Ces nombres ne sont pas exacts puisque ces moteurs ne tournent pas à la vitesse de synchronisme, mais ils se rapprochent de l'indication réelle.

6,1. Symboles employés pour établir les formules du calcul

Quelques formules de base sont nécessaires pour calculer la section des conducteurs à employer et leur nombre dans les encoches. Pour cela, la carcasse du stator et la plaque à bornes permettent de connaître :

D = Alésage du stator en mètres.

l = Longueur du stator en m (non compris les canaux de ventilation, quand il en existe).

N = Nombre total d'encoches du stator.

$2p$ = Nombre de pôles.

m = Nombre de phases.

U = Tension aux bornes en triangle et en étoile.

f = Fréquence du courant en hertz du réseau.

c = Pas polaire.

a = Facteur de remplissage.

n_1 = Nombre de spires en série par phase.

6,2. Formules fondamentales

Le flux émis par un pôle a pour valeur :

$$\Phi = \frac{E_1}{4{,}44 \times f \times n_1 \times k_1} \text{ webers} \qquad (1)$$

et $\Phi = a \times c \times l \times B$ (2)

a = facteur de remplissage des encoches égal à 0,7 isolement des fils compris;

c = pas polaire en mètres $= \frac{\pi \times D}{2p}$;

B = induction dans l'entrefer, en teslas;

k_1 = coefficient de bobinage;

4,44 = constante, tirée de E_{eff} avec une spire, soit $\frac{2\pi}{\sqrt{2}}$.

On sait que pour un conducteur seulement :

$$E_{eff} = \frac{\pi}{\sqrt{2}} \times n\, p\, \Phi = 2{,}22\, n\, p\, \Phi \text{ volts.}$$

n = Nombre de tours par seconde.

p = Nombre de paires de pôles.

Φ = Flux émis par un pôle, en webers.

Des formules (1) et (2) on tire :

$$n_1 = \frac{E_1}{4{,}44 \times f \times k_1 \times a \times c \times l \times B} \text{ spires par phase.}$$

E_1 = F.E.M. par phase à vide, en volts efficaces.

Le nombre de conducteurs en série par encoche a pour expression :

$$n_2 = \frac{2\,n_1 \times m}{N} \text{ conducteurs en série par encoche.}$$

En remplaçant c (pas polaire) et n_1 par les valeurs obtenues précédemment, on a, par encoche :

$$n_2 = \frac{m}{3{,}487 \times f \times k_1 \times a \times B} \times \frac{E_1 \times p}{D \times l \times N} \text{ conducteurs} \quad (3)$$

p = nombre de paires de pôles;
m = nombre de phases.

En sortant la première partie de la formule (3), on a un coefficient :

$$K = \frac{m}{3{,}487 \times f \times k_1 \times a \times B}$$

et on peut écrire la formule simplifiée :

$$n_2 = K \frac{E_1 \times p}{D \times l \times N} \text{ nombre de conducteurs en série par encoche.}$$

6,3. Formules à appliquer pour un bobinage triphasé

Pour une fréquence $f = 50$ Hz, avec un enroulement triphasé, on a dans la plupart des cas un coefficient de bobinage $k_1 = 0{,}96$.

L'induction B dans l'entrefer est d'environ 0,5 tesla (5 000 gauss), pour les moteurs de petite puissance, et d'environ 0,6 tesla (6 000 gauss) pour les gros moteurs.

U_1 = Tension aux bornes par phase, en volts efficaces (couplage en triangle).

E_1 = F.E.M. par phase à vide, en volts efficaces.

$E_1 = 0{,}95\ U_1$ pour les petits moteurs.

$E_1 = 0{,}995\ U_1$ pour les moteurs de l'ordre de 125 kW.

En remplaçant E_1 par U_1 dans les formules, on a, dans le cas d'un moteur jusqu'à 4 kW :

Avec $B = 0{,}5$ tesla :

$$K = \frac{3 \times 0{,}95}{3{,}487 \times 50 \times 0{,}96 \times 0{,}7 \times 0{,}5} = 0{,}048\,5.$$

Avec $B = 0{,}6$ tesla pour un moteur plus important :

$$K = \frac{3 \times 0{,}995}{3{,}487 \times 50 \times 0{,}96 \times 0{,}7 \times 0{,}6} = 0{,}042\,4.$$

La formule définitive a pour expression :

— jusqu'à 4 kW : $n_2 = 0{,}048\,5\ \dfrac{U_1 \times p}{D \times l \times N}$ conducteurs en série par encoche;

— de 5 à 25 kW : $n_2 = 0{,}048\,5$ à $0{,}045\,5\ \dfrac{U_1 \times p}{D \times l \times N}$ conducteurs;

— de 26 à 150 kW : $n_2 = 0{,}045\,5$ à $0{,}042\,4\ \dfrac{U_1 \times p}{D \times l \times N}$ conducteurs.

6,4. Application de la formule à un moteur triphasé, à 2 vitesses.

S'il s'agit d'un moteur à 2 vitesses à couplage Dahlander et Lindstrom, le coefficient de bobinage à la plus grande polarité est : $k_1 = 0{,}826$ et, à la plus faible polarité : $k_1 = 0{,}676$.

Avec un moteur triphasé normal, on a : $k_1 = 0{,}96$, ce qui permet d'obtenir le nouveau coefficient en multipliant le coefficient normal par les rapports suivants :

— **Pour la grande polarité** : $\frac{0{,}826}{0{,}96} = 1{,}162$, ce qui donne, avec une fréquence de 50 Hz, les coefficients K ci-après :

— jusqu'à 4 kW ..... $K = 0{,}056\ 3$.
— de 4 kW à 25 25 kW ..... $K = 0{,}056\ 4$ à $0{,}053$.
— de 25 kW à 150 kW ..... $K = 0{,}053$ à $0{,}490$.

Ces nouvelles valeurs de K permettent de déterminer le nombre de conducteurs n_2 à mettre en série par encoche, en utilisant la formule employée pour les moteurs triphasés normaux.

— **Pour la petite polarité.** on applique les mêmes valeurs de K pris à la grande polarité, car à la plus faible polarité on a deux conducteurs en parallèle, soit $n/2$ conducteurs en série par encoche, mais, comme le nombre de paires de pôles est $p/2$, les coefficients K ont bien les mêmes valeurs dans les deux cas.

Remarque :

En recherchant K par la plus petite polarité, on aurait eu le rapport : $\frac{0{,}96}{0{,}676} = 1{,}42$.

Comme il est démontré ci-après, le départ avec ce rapport ne convient pas.

En effet, le nombre de paires de pôles n'est que la moitié de celui de la plus grande polarité et la tension par phase est $1/\sqrt{3}$ plus faible, ce qui donne un rapport du nombre de conducteurs en série $\frac{1{,}42}{1{,}162 \times 2 \times \sqrt{3}} = \frac{1}{2{,}83}$ au lieu de $\frac{1}{2}$.

A la plus petite polarité le moteur fonctionnerait normalement.

A la plus grande polarité, il serait trop saturé.

— **Pour les moteurs à deux bobinages et deux vitesses,** on applique à chaque bobinage les formules des moteurs

normaux, avec un coefficient K variant de 0,048 5 à 0,042 4 selon la puissance du moteur.

6,5. Formules à appliquer pour un enroulement monophasé

Pour une fréquence $f = 50$ Hz et un coefficient de bobinage $k_1 = 0{,}831$ (la phase principale n'occupant que les 2/3 des encoches), on a :

$m = 1$, puisqu'il s'agit de monophasé.

Pour $B = 0{,}5$ tesla, on a :

$$K = \frac{1 \times 0{,}95 \times 1{,}5}{3{,}487 \times 50 \times 0{,}831 \times 0{,}7 \times 0{,}5} = 0{,}028$$

Pour $B = 0{,}6$ tesla, on a :

$$K = \frac{1 \times 0{,}995 \times 1{,}5}{3{,}487 \times 50 \times 0{,}831 \times 0{,}7 \times 0{,}6} = 0{,}024\,6$$

Ce qui donne, pour un moteur :

— jusqu'à 4 kW : $n_2 = 0{,}028 \dfrac{U_1 \times p}{D \times l \times N}$ conducteurs en série par encoche;

— de 5 à 25 kW : $n_2 = 0{,}028$ à $0{,}026\,5 \dfrac{U_1 \times p}{D \times l \times N}$ conducteurs;

— de 26 à 150 kW : $n_2 = 0{,}026\,5$ à $0{,}024\,6 \dfrac{U_1 \times p}{D \times l \times N}$ conducteurs.

La phase auxiliaire des moteurs monophasés a un nombre de conducteurs en série par encoche généralement double de celui de la phase principale.

6,6. Section des conducteurs

Plusieurs procédés peuvent être utilisés pour connaître la section des conducteurs.

Les formules n_2 ayant donné le nombre de conducteurs en série logés dans les encoches, il reste à déterminer la section de ces conducteurs.

On connaît :

— La dimension des encoches et la densité de courant admise.
— L'intensité absorbée par le moteur (inscrite sur la plaque).
— La densité de courant moyenne à choisir qui est de l'ordre de 5 ampères par millimètre carré de section de fil.
— La puissance du moteur, inscrite sur la plaque à bornes.
— Le facteur de remplissage de l'encoche k_3 qui est de l'ordre de 0,5 (fil nu) et 0,6 à 0,7 (isolant compris).

Ces données doivent permettre la recherche de la section du fil isolé et nu.

6,7. Premier procédé de calcul de la section

Connaissant l'intensité absorbée par le moteur branché en triangle, on divise celle-ci par la densité de courant admise dans chaque conducteur, soit 5 A environ. Le quotient obtenu donne la section du fil en mm².

6,8. Deuxième procédé de calcul de la section

La façon de trouver la section des conducteurs au moyen de la densité de courant donne des résultats très approximatifs qu'il est bon de vérifier au moyen d'un autre procédé.

Pour cela, on calcule la section des conducteurs en partant de la surface d'encoche en mm².

Cette surface étant connue, on peut écrire :

$$s = \frac{S\,k_3}{n_2} \text{ mm}^2 \text{ par conducteur isolé.}$$

S, surface de l'encoche en mm².
s, section occupée par un conducteur isolé.
n_2, nombre de conducteurs dans une encoche.

Le facteur de remplissage k_3 tient compte de l'isolation de l'encoche et des vides entre conducteurs.

La section du fil isolé étant connue, le diamètre est donné par la formule :

$$s = \frac{\pi d^2}{4} \text{ d'où, } d = \sqrt{\frac{4 \times s}{\pi}} \text{ mm.}$$

Le diamètre du fil nu peut alors être connu en consultant des tableaux établis en fonction des divers isolements : émaillé, coton, rayonne, etc. (Voir le tableau XIV,7).

6,9. Considérations sur la réalisation de ces bobinages

Pour des fréquences différentes de 50 Hz, les coefficients K utilisés peuvent être multipliés dans le rapport $\frac{50}{f}$, les coefficients de bobinage k_1 étant sensiblement les mêmes.

Pour une fréquence de 25 Hz, les coefficients K des formules sont doublés, malgré les coefficients de bobinage k_1 légèrement inférieurs.

Les coefficients K sont valables jusqu'à 500 volts entre phases. Pour une tension plus grande, il est nécessaire de les élever de 10 %.

En cas de rebobinage d'un stator en deux pôles, il est bon de vérifier s'il a été prévu pour cette polarité, car l'induction dans une couronne de stator bipolaire est théoriquement double de celle du même moteur avec 4 pôles.

Si l'on change la polarité pour laquelle le stator a été construit, il convient de vérifier si le nombre d'encoches N permet cette nouvelle polarité.

XIV,7. Tableau des diamètres des fils nus et isolés destinés au bobinage des machines électriques

Section du fil nu mm²	Diamètre du fil nu mm	Diamètre du fil émaillé mm	Diamètre du fil avec 1 couche rayonne mm	Diamètre du fil avec 2 couches coton mm	Résistance à 15 °C Ω/km
0,384	0,70	0,76	0,79	0,86	45,212
0,441	0,75	0,81	0,84	0,91	39,385
0,502	0,80	0,865	0,89	0,96	34,616
0,636	0,90	0,975	1,03	1,08	27,351
0,785	1,00	1,08	1,13	1,18	22,154
0,950	1,10	1,18	1,23	1,28	18,309
1,130	1,20	1,28	1,33	1,38	15,384
1,227	1,25	1,33	1,38	1,43	14,178
1,327	1,30	1,38	1,43	1,48	13,109
1,539	1,40	1,48	1,53	1,58	11,303
1,767	1,50	1,585	1,63	1,72	9,846
2,010	1,60	1,685	1,75	1,82	8,654
2,269	1,70	1,785	1,85	1,92	7,665
2,544	1,80	1,885	1,95	2,02	6,837
3,141	2,00	2,09	2,15	2,22	5,585
3,463	2,10	2,19	2,25	2,34	5,023
3,801	2,20		2,35	2,44	4,577
3,976	2,25		2,40	2,49	4,376
4,154	2,30		2,45	2,54	4,187
4,524	2,40		2,55	2,64	3,846
4,908	2,50		2,65	2,74	3,544
5,309	2,60		2,76	2,86	3,277
6,157	2,80		2,96	3,06	2,826
7,068	3,00		3,16	3,26	2,461

7,1. Tableau des diamètres des fils nus, émaillés, isolés soie et rayonne

Section du fil nu mm^2	Diamètre du fil nu mm	Diamètre à fort émaillage mm	Diamètre isolé 2 couches soie mm	Diamètre isolé 1 couche rayonne mm	Diamètre isolé 2 couches rayonne mm
0,0 314	0,20	0,225	0,285	0,29	0,36
0,0 380	0,22	0,25	0,305	0,31	0,38
0,0 453	0,24	0,27	0,325	0,33	0,40
0,0 490	0,25	0,28	0,335	0,34	0,41
0,0 572	0,27	0,30	0,355	0,36	0,43
0,0 625	0,28	0,31	0,365	0,37	0,44
0,0 706	0,30	0,33	0,385	0,39	0,46
0,0 754	0,31	0,34	0,395	0,40	0,47
0,0 804	0,32	0,355	0,405	0,41	0,48
0,0 907	0,34	0,375	0,425	0,43	0,50
0,0 962	0,35	0,385	0,435	0,44	0,51
0,1 075	0,37	0,405	0,46	0,46	0,53
0,1 134	0,38	0,415	0,47	0,47	0,54
0,1 256	0,40	0,44	0,49	0,49	0,56
0,1 385	0,42	0,46	0,51	0,51	0,58
0,1 520	0,44	0,48	0,53	0,53	0,60
0,1 661	0,46	0,50	0,55	0,55	0,62
0,1 809	0,48	0,52	0,57	0,57	0,64
0,1 963	0,50	0,545	0,59	0,59	0,66
0,2 119	0,52	0,565	0,61	0,61	0,68
0,2 375	0,55	0,595	0,64	0,64	0,71
0,2 640	0,58	0,625	0,67	0,67	0,74
0,2 827	0,60	0,655	0,69	0,69	0,76
0,3 017	0,62	0,675	0,71	0,71	0,78
0,3 318	0,65	0,705	0,74	0,74	0,81
0,3 630	0,68	0,735	0,77	0,77	0,84

CHAPITRE XV

ROTORS DES MOTEURS ASYNCHRONES

XV,1. DIFFÉRENTS TYPES DE ROTORS

Les rotors ou induits des moteurs asynchrones comportent un enroulement fermé en court-circuit, dont les conducteurs sont le siège de courants induits produits par le champ du stator.

L'enroulement de ces induits se divise en deux classes :

— **Les rotors bobinés à bagues ;**
— **Les rotors à cage d'écureuil.**

Quel que soit le type employé, l'enroulement est fermé sur lui-même lorsque le moteur tourne.

Le tambour du rotor est constitué par des disques encochés, en tôle d'acier supérieur au silicium d'une épaisseur de 0,5 mm.

Ces disques sont recouverts d'une couche d'émail sur deux faces ou d'un mince papier collé sur une face, ou simplement oxydés pour les petits rotors.

Les pertes totales relativement faibles de ces tôles sont de l'ordre de 2,6 W/kg pour une induction de 10 000 G (1 tesla), à la fréquence de 50 Hz.

XV,2. LES ROTORS BOBINÉS

Le nombre des phases du rotor est indépendant de celui des phases du stator.

Quel que soit le nombre de phases de l'enroulement du stator, les rotors à bagues peuvent être bobinés en diphasé ou en triphasé.

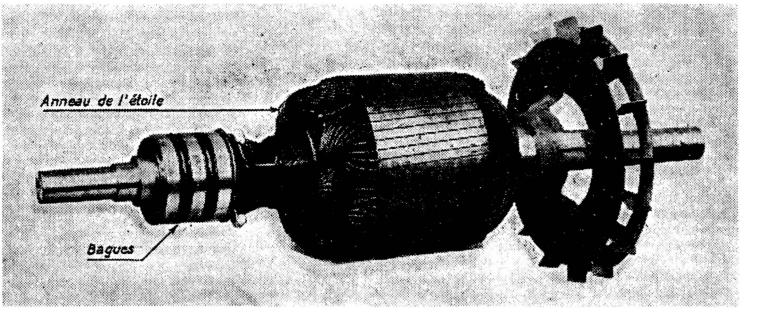


FIG. XV-1. — Rotor bobiné à bagues, muni de son ventilateur. L'enroulement est du type « à fil tiré », sur deux plans. Il comprend 3 circuits dont les entrées, reliées sur un anneau, côté bagues, forment l'étoile. Les 3 sorties sont connectées aux 3 bagues de bronze. Certains constructeurs remplacent le bronze par de la fonte bien polie périphériquement. Ces bagues, isolées de la masse et entre elles, sont clavetées sur l'arbre.

L'enroulement diphasé convient pour les petites puissances et permet de simplifier l'appareillage de démarrage. Malgré cet avantage, le bobinage triphasé est le plus généralement employé, car la puissance transmise par le rotor est proportionnelle au nombre de phases de celui-ci.

Le rotor d'un moteur asynchrone se comporte comme le secondaire d'un transformateur, et le rapport de trans-

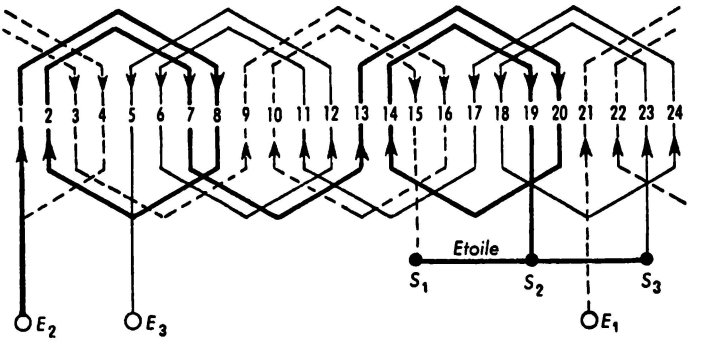


FIG. XV-2. — Schéma d'enroulement triphasé, 24 encoches, 4 pôles, bobines concentriques, couplage en étoile.

formation entre le stator et le rotor dépend du rapport des nombres de spires, d'où :

$$E_2 = E_1 \frac{N_2}{N_1}.$$

E_1, volts au stator; N_1, nombre de spires au stator.
E_2, volts au rotor; N_2, nombre de spires au rotor.

La puissance fournie par la poulie du moteur est proportionnelle :

— à la F.E.M. par phase du rotor;
— à l'intensité par phase du rotor;
— au nombre de phases du rotor.

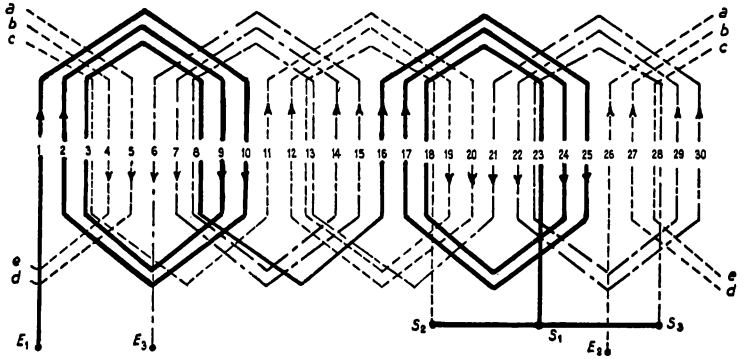


FIG. XV-3. — Schéma d'enroulement d'un rotor de moteur asynchrone triphasé à « fil tiré », comportant 4 pôles, 30 encoches, 2,5 encoches par pôle et par phase, 2 ondes en série, couplage étoile, bobines concentriques sur deux plans.

Pour un moteur de 3,5 ch, l'enroulement est constitué par 12 fils de 2,6 mm par encoche. Une encoche sur 5 reçoit 6 conducteurs de deux phases différentes.

2,1. Règles concernant le bobinage des rotors

Si le stator et le rotor d'un moteur asynchrone peuvent être bobinés avec un nombre de phases différent, par contre, ils doivent répondre aux conditions suivantes :

— avoir le même nombre de pôles;
— comprendre un nombre différent d'encoches par pôle et par phase.

Ces nombres sont choisis premiers entre eux afin d'éviter les variations brusques du flux dans les conducteurs.

Pour amortir ces variations, certains constructeurs font en outre des encoches obliques dans le rotor.

Afin d'équilibrer mécaniquement l'enroulement du rotor, on dispose les entrées des phases à 120° les unes des autres. Cette variante des entrées et sorties ne doit rien changer au sens du courant dans les faisceaux.

Les encoches des rotors sont semi-fermées, ce qui nécessite un enroulement à « fils tirés » pour les petites et moyennes puissances.

Pour les moteurs importants, l'enroulement est fait par « enfilade » au moyen de barres, à raison de deux faisceaux par encoche.

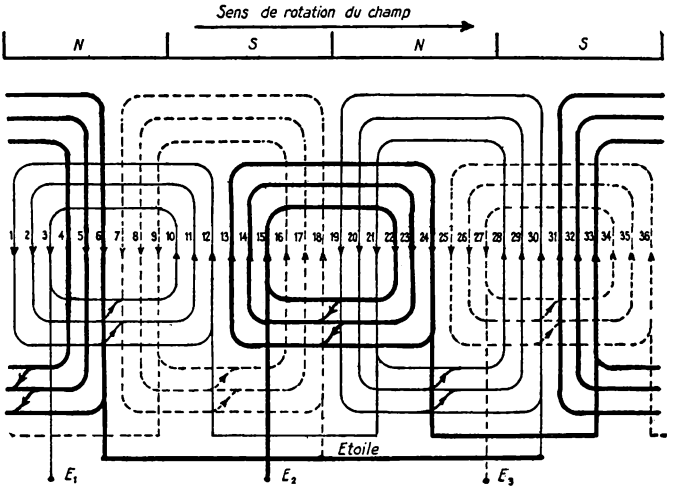


FIG. XV-4. — Schéma d'enroulement d'un rotor de moteur asynchrone triphasé à « fil tiré », comportant 4 pôles, 36 encoches, 3 encoches par pôle et par phase, 2 ondes en série, 3 phases en étoile, bobines concentriques sur deux plans. Les entrées des phases sont effectuées à 120° géométriques l'une de l'autre afin d'équilibrer mécaniquement le rotor.

XV,3. ENROULEMENT DES ROTORS BOBINÉS A « FIL TIRÉ »

Le bobinage à fil tiré nécessite deux personnes, placées de part et d'autre du rotor.

Pour exécuter ce bobinage, on commence par enfiler un tube isolant (capote) dans les encoches par lesquelles on commence l'enroulement. Cette opération terminée, on garnit les capotes d' « aiguilles » constituées par des fils d'acier ayant le diamètre du fil à bobiner, isolant compris.

Les bobineurs calculent ensuite la longueur du fil nécessaire pour enrouler une ou plusieurs bobines, sans que cette longueur dépasse une quinzaine de mètres. Au-delà de cette longueur, il est préférable d'utiliser deux tronçons que l'on soude à l'étain, bout à bout, après les avoir intro-

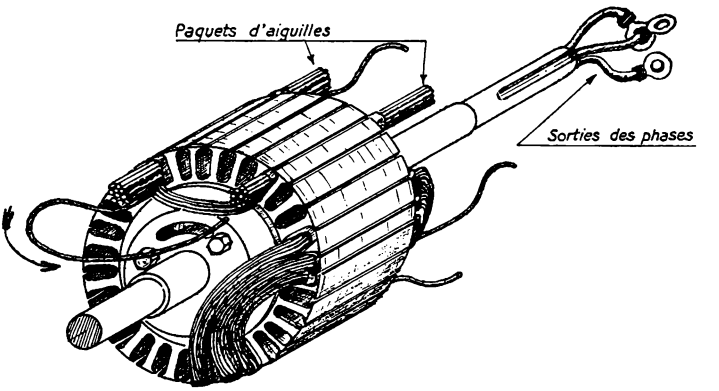


FIG. XV-5. — Bobinage en fil tiré d'un rotor de moteur asynchrone.

Les « aiguilles » tiennent la place des conducteurs et sont retirées au fur et à mesure de l'avancement du bobinage. Les aiguilles sont constituées par des fils en acier dont le diamètre est égal à celui du fil, plus l'épaisseur de l'isolant. Ce procédé d'enroulement nécessite 2 bobineurs, placés de part et d'autre de l'induit, pour tirer alternativement sur le fil. A l'extrémité de l'arbre, on remarque les sorties du bobinage qui seront reliées aux bagues.

duits à l'intérieur d'une douille en cuivre ou en laiton mince étamé et roulé au diamètre du fil (*fig. XIV-2*). La jonction des deux tronçons doit s'effectuer hors des encoches.

Les aiguilles, dont le nombre doit être égal au nombre de conducteurs par encoche, sont retirées au fur et à mesure que le fil garnit l'encoche. En effet, pour passer le fil, il faut retirer une aiguille en commençant par le fond de l'encoche, de telle sorte que le fil prenne insensiblement la place des aiguilles.

Avant de commencer le bobinage, on arrondit à la lime, avec soin, l'extrémité du fil et on enduit de paraffine et de talc l'isolant sur une vingtaine de centimètres afin de faciliter son glissement dans l'encoche.

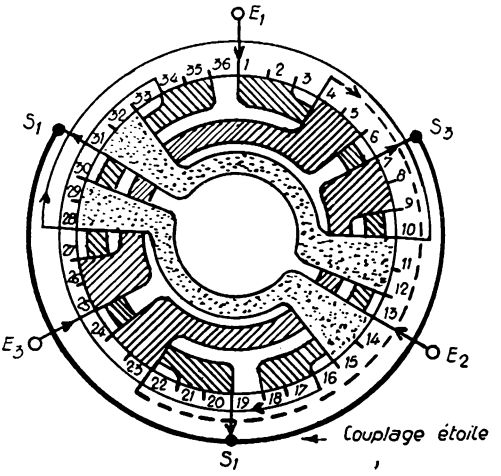


FIG. XV-6. — Schéma par projection frontale d'un rotor triphasé 2 pôles, 36 encoches, 6 encoches par pôle et par phase. L'enroulement à fil tiré est exécuté sur trois plans. Les entrées sont à 120° l'une de l'autre, afin d'équilibrer mécaniquement le rotor. **E_1 entre à l'encoche 1 et sort à l'encoche 19, E_2 entre à 13 et sort à 31, E_3 entre à 25 et sort à 7. L'étoile réunit les trois sorties.**

Les bobineurs se placent de chaque côté du stator et tirent le fil à tour de rôle, tout en formant les têtes de bobines.

Durant l'exécution de ce bobinage, il faut veiller à ce que les têtes de bobines ne débordent pas exagérément des encoches, car il ne serait plus possible de placer les flasques.

Pour exécuter ces enroulements, on commence par mettre en place le premier plan, puis on coiffe celui-ci par le deuxième. Le troisième plan, s'il en existe un troisième, recouvre le deuxième plan.

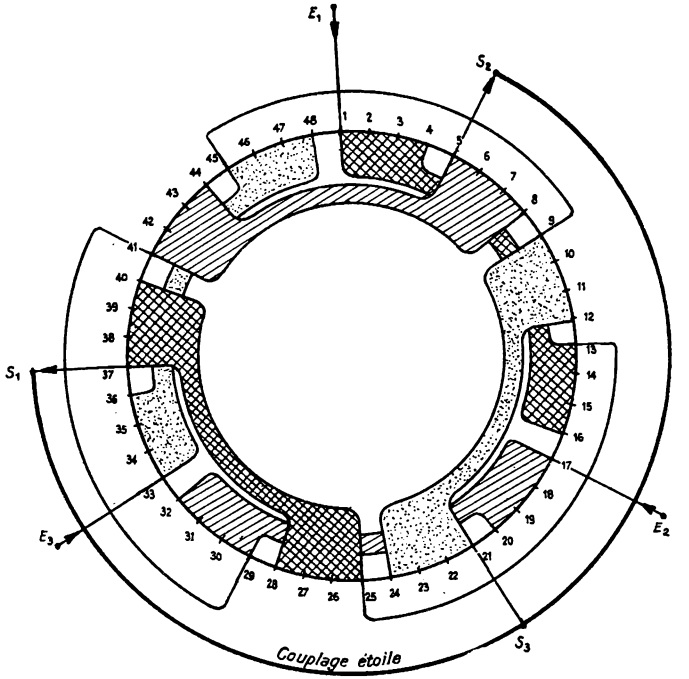


FIG. XV-7. — Schéma frontal du bobinage d'un rotor de moteur triphasé à 4 pôles, 48 encoches, 4 encoches par pôle et par phase, couplage étoile.

Dans la phase E_1, le courant pénètre par l'encoche 1, sort à l'encoche 13 pour entrer dans la deuxième bobine par 25 et sortir à 37. Cette sortie correspond à S_1, qui est relié à l'étoile. **Le bobinage est exécuté avec deux plans.**

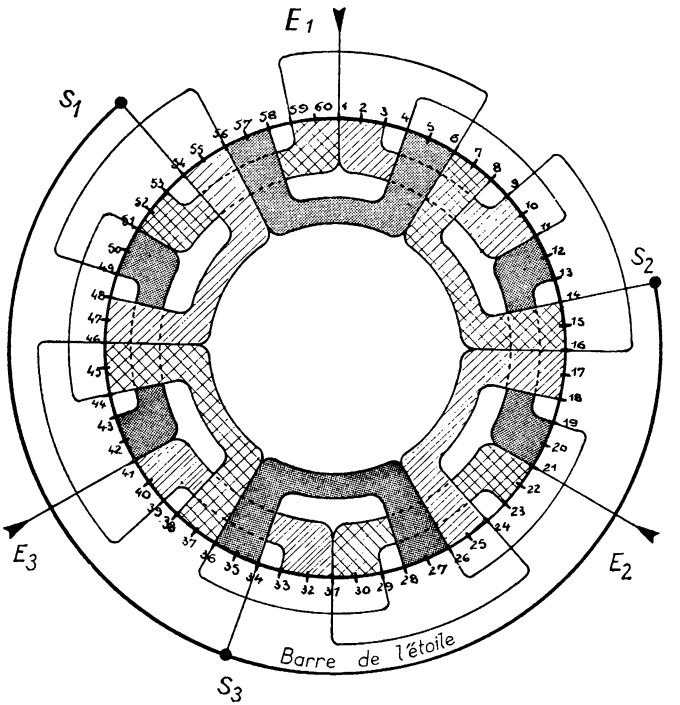


FIG. XV-8. — Schéma frontal d'un rotor de moteur triphasé à 8 pôles, 60 encoches, 3 encoches par pôle et par phase, couplage étoile.

XV,4. ENROULEMENT A BARRES DES ROTORS

La mise en place des barres a été traitée sommairement dans le chapitre XIII,6.

Cet enroulement s'applique également aux rotors des moteurs asynchrones sous la forme imbriquée ou ondulée.

Les encoches étant du type semi-fermé, il n'est pas possible de passer les barres par la fente.

La mise en place de l'enroulement se fait au moyen de faisceaux de barres formés d'un seul côté, afin de permettre leur introduction dans les encoches. L'autre extrémité est pliée par le bobineur lorsque les faisceaux d'un plan sont en place.

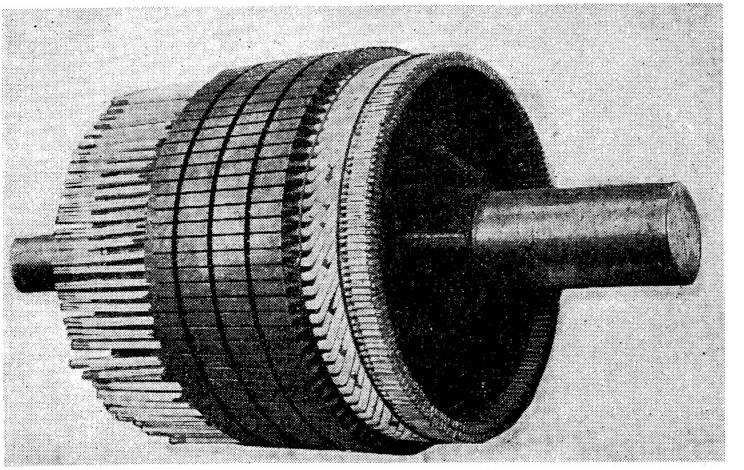


FIG. XV-9. — Bobinage à barres d'un rotor de moteur triphasé.
Les faisceaux, pliés d'un seul côté, sont mis en place par enfilade; l'enroulement est dit « à baïonnette ». L'enrouleur plie ensuite la partie droite du faisceau au profil exigé. Un côté de l'enroulement est prêt à être soudé, les douilles qui relient le plan supérieur au plan inférieur sont en place, ainsi que les cales en bois qui séparent les douilles. Ces cales seront enlevées après la soudure des douilles et le tournage des extrémités des faisceaux qui dépassent les douilles.

Les faisceaux comprennent généralement plusieurs barres isolées les unes des autres. La partie droite du faisceau qui se trouve dans l'encoche a son isolement renforcé par une capote en papier micacé ou bakélisé à chaud. Les parties obliques des faisceaux sont enrubannées à la tresse de coton (*fig. VIII-4*).

Pour former les sections, on réunit une barre du plan inférieur à une barre du plan supérieur au moyen d'une douille en cuivre étamé, d'après les indications du schéma.

Puis, avant de souder le tout, on bloque les douilles avec des petites cales en bois, afin de les faire plaquer contre les barres (*fig. XV-9*).

Pour souder, on utilise la résine liquide comme décapant, à l'exclusion de décapant acide.

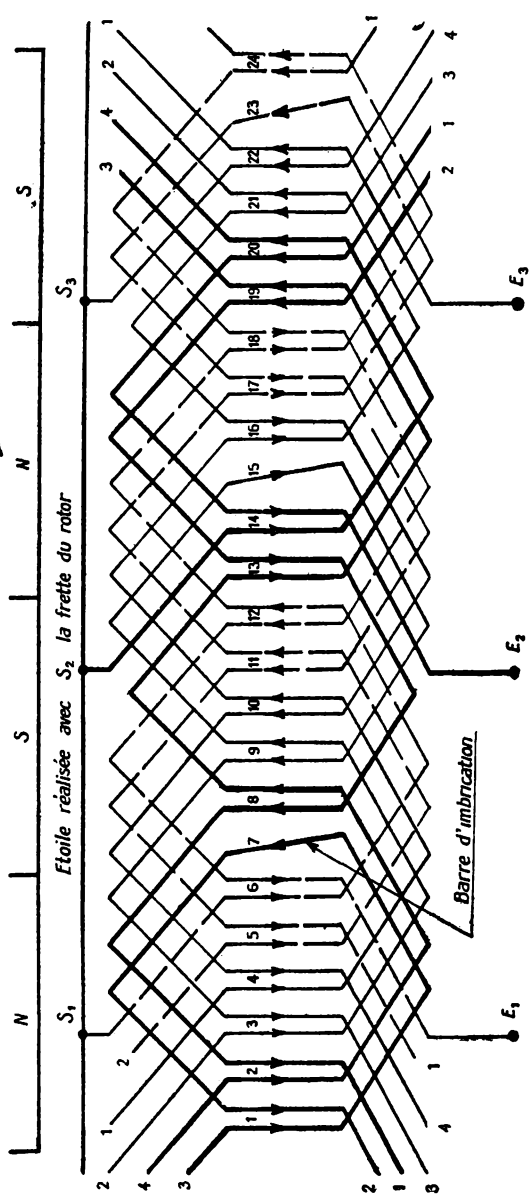


FIG. XV-10. — Schéma d'enroulement à barres d'un rotor de moteur asynchrone triphasé 4 pôles, 24 encoches, 2 faisceaux par encoche, enroulement ondulé rétrograde avec 3 barres de **retour** dites « d'imbrication ».

Ces barres, disposées à 120° géométriques l'une de l'autre, suppriment les connexions de mise en série des ondes et font aboutir les sorties des phases du côté opposé aux entrées. Les barres d'imbrication ont la forme imbriquée et sont seules dans l'encoche.

4,1. Enroulement avec barres de retour ou barres d'imbrication

Les connexions de mise en série des ondes des bobinages à barres doivent être solidement fixées à l'intérieur du plateau de serrage pour résister à l'action de la force centrifuge.

Pour supprimer ces connexions dans les enroulements ondulés, on a recours aux barres d'imbrication. Les entrées et sorties de phases se font de part et d'autre du rotor. Pour obtenir ce résultat, on supprime une barre à chaque phase dans des encoches placées à 120° sur la périphérie de l'induit. La barre qui reste est inclinée, elle est inférieure d'un côté et supérieure de l'autre et sa forme est imbriquée.

Les vides dans l'encoche sont garnis par deux cales en bois taillées en biseau.

La connexion étoile de l'enroulement est obtenue en soudant les trois sorties sur une frette de façon à supprimer toutes les connexions en dehors des trois entrées reliées aux bagues.

Malgré les avantages que peuvent présenter ces dispositions, les enroulements ondulés avec barres d'imbrication sont assez peu employés en raison du bruit que produisent les machines modernes poussées, utilisant ce genre de bobinage.

D'autre part, si le frettage n'est pas largement dimensionné comme section, il peut arriver que les soudures des frettes fondent sous l'action de courants élevés.

XV,5. ROTORS EN COURT-CIRCUIT

5,1. Généralités.

Les rotors en court-circuit peuvent être bobinés :

— à spires bouclées, en fil rond ou à barres, comme il est spécifié sur les *figures* XV-11 et XV-12;

— en forme de cage d'écureuil, en barres rondes ou rectangulaires. Dans ce bobinage, on utilise le même

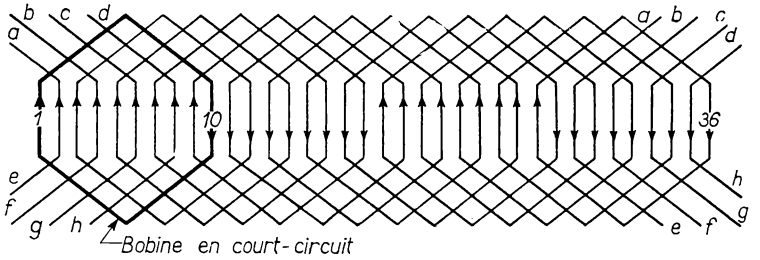


FIG. XV-11. — Rotor bobiné en court-circuit, 18 encoches, 36 barres, 4 pôles. Pas de 1 à 10, à enroulement imbriqué et enchevêtré.

nombre de conducteurs que s'il s'agissait d'un rotor bobiné normal, mais les encoches ne sont pas capotées et les conducteurs sont nus.

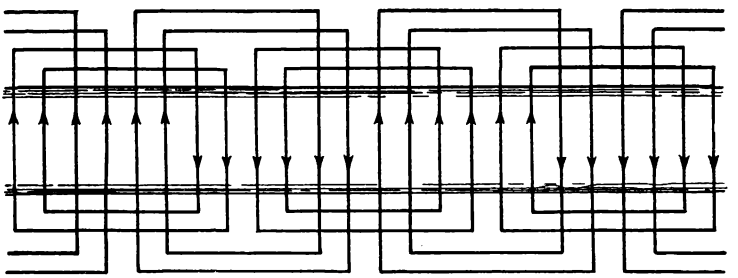


FIG. XV-12. — Rotor bobiné en court-circuit, avec fil rond. 24 encoches, 4 pôles, 6 bobines à 4 faisceaux en série et court-circuités.

5,2. Les rotors à cage d'écureuil.

Les rotors à cage d'écureuil des moteurs asynchrones sont constitués par un cylindre en disques de tôles empilées, percées de trous sur la périphérie pour former des encoches.

Ces encoches, fermées ou semi-fermées, sont destinées à recevoir le bobinage du rotor, qui est constitué par des barres en cuivre nu, ou par de l'aluminium coulé sous pression à une température voisine de 735°C.

Les cages en cuivre sont faites avec des barres d'égale longueur, enfilées dans les encoches et rivées ou brasées sur deux cercles en cuivre, disposées de part et d'autre du rotor.

La brasure au cuivre se fait au chalumeau (gaz-oxygène), à une température d'environ 750 °C. Elle peut également être exécutée par soudure à l'arc électrique.

Il n'y a pas, à proprement parler, de bobinage dans ces rotors. Les conducteurs, réunis en parallèle de chaque côté du cylindre de tôles magnétiques, forment une cage solide au point de vue mécanique et peu résistante électriquement.

Les rotors à cage peuvent être classés en trois catégories :

1° Les cages simples, à barres de cuivre rondes, carrées, rectangulaires, ou en aluminium coulé sous pression.

2° Les cages doubles et triples, superposées et reliées entre elles par une fente.

3° Les cages à encoches profondes et de faible largeur.

5,3. Rotors à simple cage

Les rotors à cage d'écureuil en aluminium coulé sous pression se généralisent de plus en plus. Les disques en tôle de ces rotors ne sont pas isolés; la température de fusion de l'aluminium brûlerait le papier ou ferait fondre le vernis isolant.

La coulée d'aluminium produit non seulement le remplissage des encoches, mais elle forme également les deux cercles du rotor, qui court-circuitent toutes les barres.

Dans les moteurs pourvus de ventilateur, ce dernier est coulé avec le bobinage dont il fait partie intégrale.

Les moteurs à cage prennent au réseau un courant important au démarrage (trois à quatre fois le courant de pleine charge), en raison de la faible résistance électrique du rotor et de l'impossibilité de brancher un rhéostat sur un enroulement en court-circuit.

Quoique l'intensité absorbée soit grande au départ, le couple de ces moteurs est faible et ne permet que des démarrages à vide, sauf toutefois pour les moteurs de petite puissance, qui peuvent démarrer en charge sans difficulté. Pour diminuer l'appel de courant et augmenter le couple au démarrage, on a imaginé des rotors à double cage, à triple cage et à encoches profondes.

5,4. Rotors à double cage

Le bobinage de ces rotors se fait au moyen de conducteurs nus, ou avec de l'aluminium coulé sous pression, comme pour les cages simples.

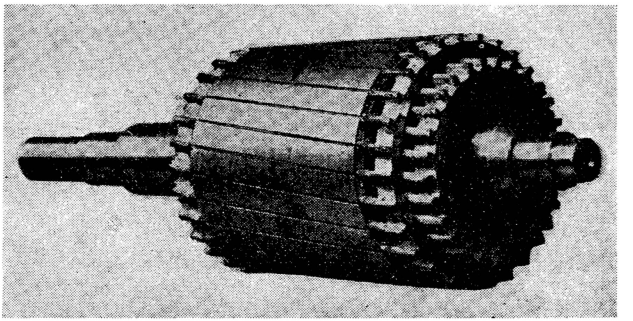


FIG. XV-13. — Rotor à double cage d'écureuil, à barres de cuivre brasées sur les couronnes en cuivre.

Les rotors à double cage avec conducteurs nus comportent une cage extérieure à encoches rondes ou carrées, **appelée cage résistante.**

C'est elle qui intervient au démarrage en fournissant un couple important.

Les barres de ce bobinage sont : soit en bronze avec une résistivité à chaud voisine de 0,036 Ω mm²/m; soit en laiton avec une résistivité de 0,06 à 0,1 Ω mm²/m.

Les moteurs à pôles multiples ont une grande impédance qui limite le courant au démarage et diminue le couple qui est proportionnel au carré de l'intensité absorbée.

On utilise pour la cage de ces moteurs un métal moins résistant que pour la cage d'un moteur à **deux** ou **quatre** pôles :

5,5. Exemples.

— Pour un moteur de **huit** pôles, on utilise du bronze avec une résistivité de 0,036 Ω mm²/m.

— Pour un moteur à **deux** pôles, on prend du laiton de 0,06 à 0,07 Ω mm²/m.

La cage intérieure, qui comporte des encoches rectangulaires, est profondément noyée et contient des barres en cuivre qui la rendent peu résistante. Elle comprend généralement une fois moins d'encoches que la cage résistante en raison de sa position centrale dans le rotor.

La cage en cuivre peu résistante possède par contre beaucoup d'inductance dont l'action se fait sentir lorsque le moteur est lancé. Cette cage fournit le couple nécessaire à la marche du moteur.

L'isthme réunissant les encoches est vide de matière. Les extrémités des barres des deux cages sont brasées sur des cercles en cuivre comme pour les rotors à simple cage, chaque cage ayant ses cercles propres.

Les doubles cages en aluminium coulé sont moins souples que celles du type précédent. L'aluminium remplit aussi bien l'isthme que les encoches des deux cages. Il est injecté sous pression dans le paquet de tôles et forme des barres au profil des encoches.

On obtient, par la même coulée, les cercles et les ailettes du ventilateur.

La fabrication des doubles cages en aluminium tend à se généraliser en raison des commodités de fabrication et des règles administratives qui sont moins rigoureuses pour la limitation du courant au démarrage avec ce type de **moteur.**

XV,6. ROTORS A ENCOCHES PROFONDES

Dans ces rotors, les encoches sont profondes, de section rectangulaire ou en forme de L.

Au démarrage, le courant se porte à la partie supérieure des encoches, comme l'indique la *figure* XV-15. Il résulte

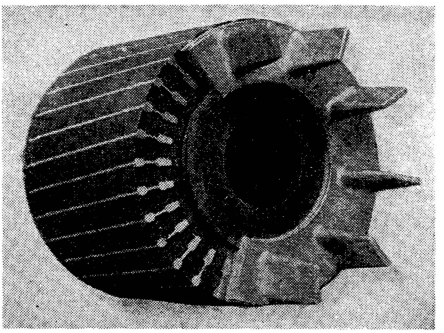


FIG. XV-14. — Rotor à double cage, en aluminium coulé sous pression. Les ailettes de ventilation sont coulées en même temps que les barres et font partie intégrante de l'anneau qui relie les faisceaux de barres entre eux.

de ce fait que le rotor se comporte comme si la section des conducteurs de son enroulement se trouvait réduite, d'où une augmentation des pertes par effet Joule, que l'on peut assimiler à une augmentation de la résistance ohmique du rotor.

Lorsque le moteur est démarré, le courant se déplace vers le bas de l'encoche et se répartit à peu près uniformément sur toute la section de la barre.

Cette disposition a pour but d'améliorer le couple du moteur au démarrage pour un courant d'appel inférieur à celui d'un moteur à simple cage. Les caractéristiques de ces moteurs sont sensiblement les mêmes que celles d'un moteur double cage, avec un couple de démarrage légèrement plus faible et un appel de courant plus grand.

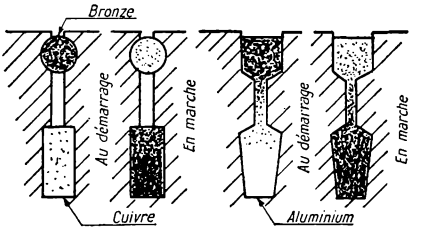


FIG. **XV-15.** — Répartition du courant au démarrage et en marche normale dans les conducteurs d'un rotor à double cage en **cuivre et en** aluminium coulé. La densité du courant est figurée **en pointillé, elle est maximum dans les parties foncées.**

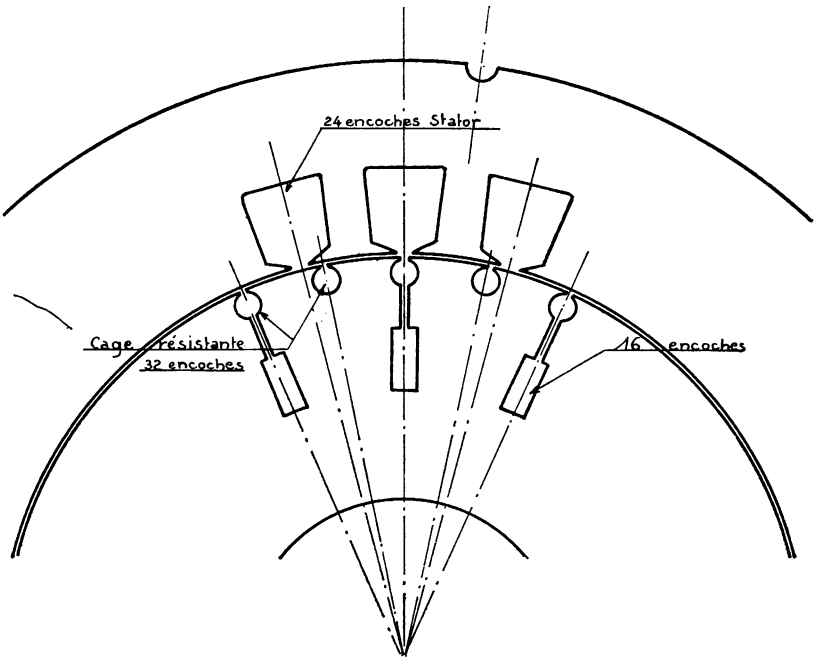


FIG. XV-16. — Vue frontale partielle des encoches d'un moteur asynchrone triphasé à rotor, à double cage. Le nombre des encoches de la cage résistante est de 32, tandis que l'autre cage n'en comporte que 16 et le stator 24.

CHAPITRE XVI

LES GÉNÉRATEURS DE COURANT ALTERNATIF

XVI,1. LES ALTERNATEURS

1,1. Description organique et fonctionnelle.

La force électromotrice induite dans les conducteurs des générateurs animés d'un mouvement rotatif est alternative.

Pour obtenir un courant dirigé toujours dans le même sens (dynamo à courant continu), il a fallu avoir recours à un dispositif constitué par un collecteur et des balais.

En remplaçant le collecteur par deux bagues et en reliant ces bagues aux extrémités de l'enroulement, on recueille un courant alternatif tel qu'il est produit dans les conducteurs.

Les générateurs de courant alternatif sont appelés « alternateurs ». Ils sont réversibles, c'est-à-dire qu'ils deviennent moteurs lorsqu'on les alimente par une source de courant alternatif, après avoir été amenés au préalable à la vitesse de synchronisme. On les désigne alors sous le nom de « moteurs synchrones ».

Les alternateurs de petite puissance (en dessous de 10 kVA) sont quelquefois constitués comme les machines à courant continu, avec un inducteur fixe et un induit mobile. Ils ne possèdent pas de collecteur, mais des bagues reliées au bobinage, sur lesquelles on collecte le courant au moyen de balais.

Les induits d'alternacycles de bicyclettes ne comportent qu'une bague, à laquelle aboutit une extrémité de l'enroulement; l'autre extrémité est soudée à la masse. Dans ces petites machines, l'inducteur est constitué par un aimant permanent fixe.

D'une façon générale, les alternateurs industriels comportent un induit fixe appelé « stator » et un inducteur mobile appelé « rotor ». Ce dispositif a l'avantage de faciliter l'isolement du bobinage statorique logé dans des encoches ouvertes.

D'autre part, cet aménagement supprime les inconvénients résultant des diverses actions mécaniques s'exerçant sur l'enroulement, lorsqu'il est soumis à une vitesse périphérique élevée. Le bobinage du rotor inducteur est alimenté avec du courant continu, l'enroulement du stator est relié au réseau.

1,2. Différents types d'alternateurs

On construit surtout des alternateurs triphasés, les alternateurs diphasés étant l'exception. Les alternateurs monophasés ne sont qu'un cas particulier de l'alternateur triphasé.

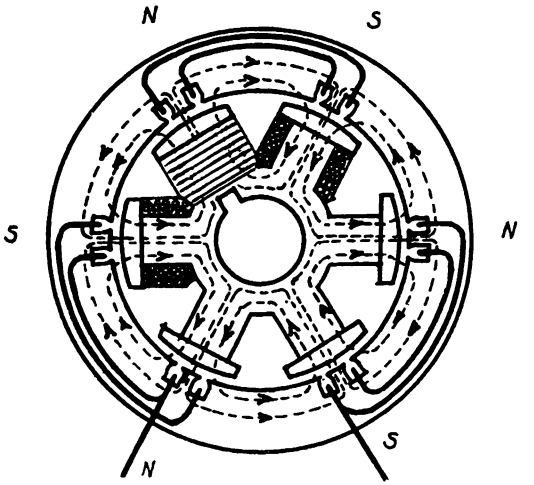


FIG. XVI-1. — Alternateur monophasé à 6 pôles saillants au rotor et 12 encoches au stator. Les noyaux polaires de la figure supportent 3 bobines, dont 2 en coupe. La répartition des lignes du champ est donnée par les traits ponctués. Les traits pleins figurent l'enroulement du stator.

On utilise ces derniers comme générateurs monophasés en branchant le réseau à deux phases (montage étoile), la troisième pouvant servir de rechange.

Dans ce cas, l'inducteur, ou rotor de l'alternateur, comporte des barres de cuivre noyées dans les pièces polaires et reliées entre elles par des anneaux de court-circuit. Ce dispositif constitue une cage d'amortisseur servant à éliminer le champ parasite de réaction d'induit.

Le bobinage des stators d'alternateurs se loge dans des encoches pratiquées à l'intérieur de la couronne de tôles magnétiques. Elles sont du type ouvert ou semi-fermé.

1,3. Puissance des alternateurs.

La puissance fournie par ces différents alternateurs a pour expression :

Alternateur monophasé : $P = UI \cos \varphi$.

Alternateur diphasé : $P = 2\ UI \cos \varphi$ (U, tension d'une phase; I, intensité d'une phase).

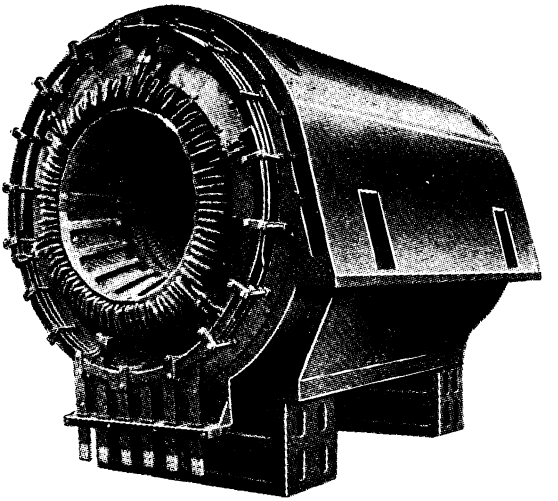


FIG. XVI-2. — Stator d'un turbo-alternateur « Jeumont » de 50 MVA. On remarque la forme allongée du stator qui doit contenir un rotor à grande vitesse : 1 500 ou 3 000 tr/mn. A l'avant du stator sont disposées les six sorties des trois phases.

Alternateur triphasé : $P = UI\sqrt{3}\cos\varphi$ (U, tension entre phases ; I, courant en ligne).

Description.

L'alimentation de l'inducteur se fait, en courant continu basse tension (35 à 250 V), au moyen d'une excitatrice (dynamo excitée en dérivation) disposée en bout d'arbre de l'alternateur ou comporter une excitation statique qui se généralise actuellement. Exceptionnellement, la source de courant peut provenir d'une source séparée.

Les alternateurs sont construits pour des tensions qui peuvent atteindre 16 500 V. Certains constructeurs étrangers ont réalisé des alternateurs de 33 000 V qui ont été reliés directement à une ligne de transport d'énergie.

Ces machines produisent un courant alternatif dont la fréquence dépend du nombre de paires de pôles et de la vitesse de rotation.

Le bobinage de l'induit ou stator aboutit à des bornes isolées fixes, sur lesquelles on recueille le courant.

On construit des alternateurs à axe vertical dont le diamètre d'alésage dépasse 8 m et la puissance 100 000 kVA.

La fréquence usuelle adoptée en Europe est de 50 Hz. Elle est de 60 Hz aux U.S.A.

XVI,2. F.E.M. EFFICACE DES ALTERNATEURS

2,1. Généralités.

Lorsqu'un alternateur tourne, la F.E.M. induite est maximale dans les conducteurs au moment où ceux-ci se trouvent dans l'axe des pôles.

Ce fait amènerait à loger le plus grand nombre possible de conducteurs en série dans un espace restreint, c'est-à-dire dans une seule encoche sous chaque pôle.

En pratique, pour des raisons de refroidissement du bobinage et pour obtenir une courbe de la F.E.M. parfaitement sinusoïdale, l'enroulement comporte plusieurs encoches par pôle et par phase.

Pour tenir compte du déphasage entre les F.E.M. induites dans les différentes bobines, on est conduit à rechercher un facteur de correction appelé « coefficient de bobinage ».

2,2. Calcul de la F.E.M.

Pendant le temps T d'une période, le flux coupé par un conducteur est deux fois le flux d'un pôle, soit $2\,\Phi$.

$$E_{moyen} = \frac{2\,\Phi}{T} = 2\,\Phi f = 2\,\Phi n p \text{ volts};$$

$$E_{efficace} = 2\,\Phi n p \times \frac{\pi}{2\sqrt{2}} = \frac{\pi}{\sqrt{2}} \times n p \Phi \text{ volts.}$$

Pour N conducteurs en série par phase on a :

$$E_{efficace} = \frac{\pi}{\sqrt{2}} \times N n p \Phi = 2{,}22\, N n p \Phi \text{ par phase.}$$

Φ, est exprimé en webers.
p, nombre de paires de pôles.
n, tours par seconde du rotor.

Cette formule suppose que les forces électromotrices des conducteurs sont en phase, ce qui n'est pas le cas normalement quand les conducteurs d'une phase sous un pôle sont répartis dans plusieurs encoches. Voir la représentation vectorielle (*fig. XVI-3*). La somme des tensions efficaces des conducteurs 1, 2, 3 est représentée par le vecteur OA. Cette disposition conduit à introduire dans la

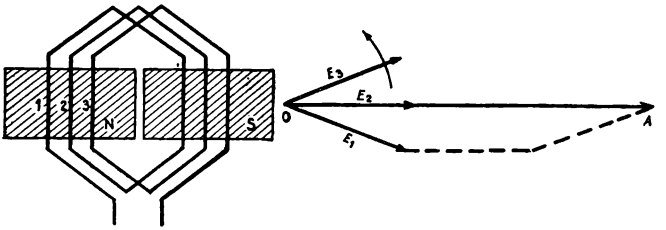


FIG. XVI-3. — Dans un alternateur triphasé, la somme des tensions efficaces des conducteurs d'une bobine, répartis dans 3 encoches sous un pôle, est représentée par le vecteur *OA*.

formule précédente un facteur inférieur à 1, appelé coefficient de bobinage k_1 :

$$k_1 = \frac{OA}{E_1 + E_2 + E_3}.$$

En tenant compte du coefficient de bobinage k_1, on a :

$$E_{eff} = 2{,}22\ k_1\ N\, n\, p\, \Phi \text{ volts par phase.}$$

Cette tension est valable pour un alternateur monophasé. Avec un alternateur triphasé couplé en étoile, il faut multiplier par $\sqrt{3}$.

Lors du calcul des alternateurs dans les bureaux d'études, on tient compte également du pas des bobines dans les encoches. Alors que le coefficient de bobinage k_1 se rapporte aux F.E.M. individuelles des conducteurs induits, le facteur k_2 dépend du raccourcissement du pas des bobines dans le champ.

XVI,3. BOBINAGE DES ALTERNATEURS MONOPHASÉS

3,1. Coefficient de bobinage (k_1).

Sa prise en considération est importante pour le calcul du bobinage des alternateurs.

Le coefficient de bobinage k_1 est toujours inférieur à 1. Il est d'autant plus petit que le nombre d'encoches par pôle et par phase est grand. Il serait sensiblement égal à 1 si tous les conducteurs d'un pôle étaient logés dans une grande encoche (*fig. XVI-4*).

Dans un alternateur monophasé, le coefficient de bobinage k_1 réduit d'un tiers la puissance de celui-ci par rapport à une machine triphasée de même importance. En effet, dans une machine monophasée bipolaire, si le bobinage d'un pôle s'étale sur 180°, le coefficient de bobinage k_1 est :

$$\frac{2}{\pi} = 0{,}638.$$

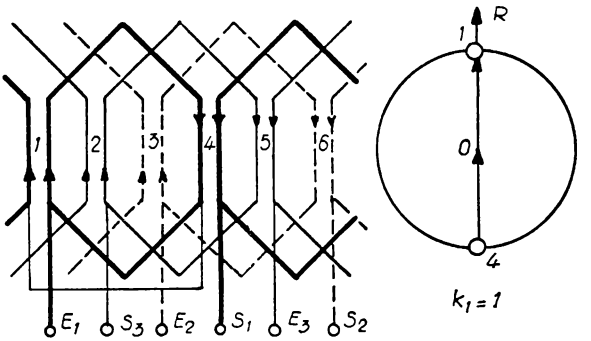


FIG. XVI-4. — Ce schéma représente le bobinage d'un stator triphasé bipolaire comportant 6 encoches, avec 2 faisceaux par encoche. On a ainsi une encoche par pôle et par phase.

Le pas de l'enroulement est un pas diamétral équidistant de 180° électriques ; or, les F.E.M. de deux faisceaux placés à 180° électriques l'un de l'autre s'ajoutent arithmétiquement et l'on a ainsi un coefficient de bobinage $k_1 = 1$.

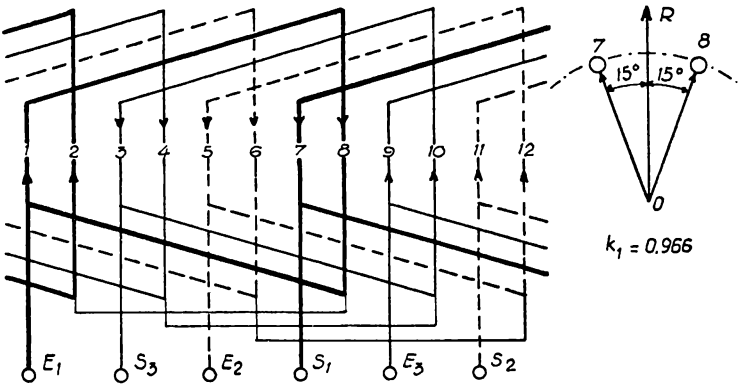


FIG. XVI-5. — Le bobinage de la figure précédente est logé ici dans 12 encoches, avec un faisceau par encoche. L'écart angulaire α en degrés électriques entre 2 encoches consécutives est :

$$\alpha = \frac{360^\circ}{12} = 30 \text{ degrés.}$$

Dans ce bobinage, on a 2 encoches par pôle et par phase. Pour trouver le coefficient de bobinage k_1 de cet enroulement, on trace une ligne médiane R au centre du pôle d'une phase, soit entre les encoches 7 et 8 par exemple. Puis on cherche l'écart angulaire entre R et l'encoche 7, soit la moitié de 30° = 15°.

Le cosinus 15° = 0,966 ; d'où $k_1 = 0{,}966$.

Avec une machine triphasée, le coefficient de bobinage est :

$$\frac{3}{\pi} = 0{,}955$$

si le bobinage d'une phase s'étend sur 60° de la circonférence de l'induit (*fig. XVI-6*).

De ce qui précède, on comprend qu'il est peu avantageux d'étendre le bobinage à toutes les encoches d'un stator monophasé. En laissant vide le tiers des rainures d'une telle machine, le coefficient de bobinage est égal à :

$$\frac{3\sqrt{3}}{2\pi} = 0{,}829 \text{ pour un arc } \frac{2\pi}{3} \text{ et une corde } \sqrt{3}.$$

Le relèvement du coefficient de bobinage compense, dans une certaine mesure, la F.E.M. absente dans les encoches vides.

Ces considérations et ces valeurs sont également valables pour le bobinage des rotors de moteurs asynchrones.

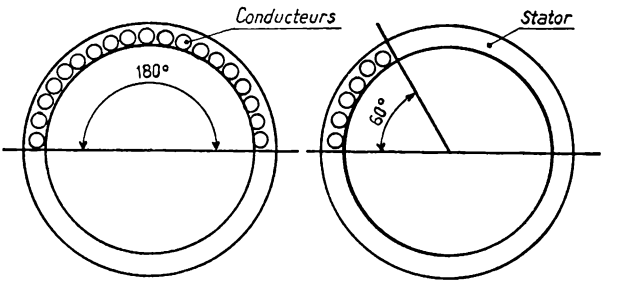


FIG. XVI-6. — L'enroulement statorique monophasé et bipolaire d'une machine à courant alternatif, dont on utilise toutes les encoches, a un arc = π, une corde = 2 et un coefficient de bobinage $k_1 = \frac{2}{\pi} = 0{,}638$.

Pour le même stator bobiné en triphasé bipolaire, les conducteurs ne sont répartis que sur 1/6 de la circonférence et sur 1/3 de pôle, l'arc = $\frac{\pi}{3}$ et la corde = rayon = 1, d'où $k_1 = \frac{3}{\pi} = 0{,}955$.

De ce qui précède, il résulte que la F.E.M. induite est la somme géométrique des F.E.M. individuelles au lieu d'être la somme arithmétique.

Pour le calcul de ces enroulements, on tient compte de ce fait et on multiplie par un coefficient de bobinage l'expression de la F. E. M. totale induite, qui devient :

$$E_{eff} = 2{,}22\ k_1\ N f \Phi \text{ volts.}$$

k_1 : coefficient de bobinage

$$2{,}22 = \frac{\pi}{\sqrt{2}};$$

Le produit 2,22 k_1 est appelé coefficient de Kapp;

N : nombre de conducteurs en série par phase;
f : fréquence en hertz;
Φ : flux maximal émis par un pôle **en webers.**

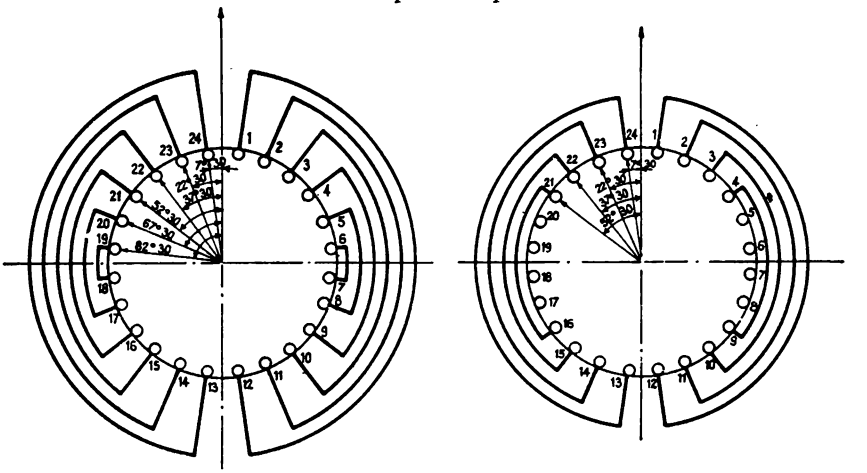


FIG. XVI-7. — Calcul du coefficient de bobinage d'un stator bipolaire monophasé 24 encoches. Bobinage concentrique à pôles alternés.

Avec toutes les encoches bobinées	Avec les 2/3 des encoches bobinées
cos 7°30′ = 0,992	cos 7°30′ = 0,992
cos 22°30′ = 0,924	cos 22°30′ = 0,924
cos 37°30′ = 0,793	cos 37°30′ = 0,793
cos 52°30′ = 0,609	cos 52°30′ = 0,609
cos 67°30′ = 0,383	3,318
cos 82°30′ = 0,131	
3,832	
soit un coefficient de bobinage k_1 = 3,832 : 6 = 0,638	soit un coefficient de bobinage k_1 = 3,318 : 4 = 0,829

3,2. Calcul du coefficient de bobinage (k_1) par la méthode des angles.

Cas d'un stator monophasé.

En prenant comme exemple un stator bipolaire d'alternateur monophasé comportant 24 encoches, on peut envisager deux cas :

1° Toutes les encoches sont bobinées;

2° Les deux tiers des encoches sont seulement bobinés.

Dans le premier cas, on a : $\frac{24}{2} = 12$ encoches bobinées par pôle, dont le pas d'encoche fait un angle de $\frac{360^\circ}{24} = 15^\circ$.

En se reportant à la *figure XVI-7*, on constate que le coefficient de bobinage est 0,638.

En utilisant seulement les deux tiers des encoches, soit 8 encoches par pôle, on a un coefficient de bobinage égal à 0,829.

De ce qui précède, on constate que la **F.E.M.** produite par les 24 encoches bobinées devrait être $\frac{24}{16} = \frac{3}{2}$ plus élevée que si les deux tiers seulement des encoches étaient bobinées, mais comme le coefficient de bobinage a diminué dans le rapport $\frac{0,638}{0,829}$, la **F.E.M.** de l'alternateur ne sera en définitive que :

$$\frac{24}{16} \times \frac{0,638}{0,829} = 1,15 \text{ plus grande.}$$

En revanche, le poids de cuivre utilisé pour l'enroulement étant 40 % plus élevé et la main-d'œuvre plus onéreuse, les constructeurs préfèrent ne bobiner que les deux tiers des encoches.

XVI,4. BOBINAGE DES ALTERNATEURS TRIPHASÉS

Généralités.

L'enroulement des stators alternateurs s'effectue avec les mêmes règles que celles utilisées pour le bobinage des moteurs asynchrones.

4,1. Différents types de bobinages triphasés.

1° Les enroulements réguliers.

Ceux-ci doivent répondre aux conditions suivantes :

— le pas Y du bobinage doit être diamétral (pas Y = pas polaire);

— le nombre d'encoches par pôle et par phase q doit être un nombre entier (pair ou impair);

— l'écart angulaire entre phases Θ doit être égal à $2\,\pi/m$.
m = nombre de phases.

2° Les enroulements semi-réguliers.

Ceux-ci ne répondent pas complètement aux conditions d'un enroulement régulier, sauf en ce qui concerne l'écart angulaire entre phases.

Les bobinages semi-réguliers peuvent comprendre :

— un pas Y diamétral et q fractionnaire;
— un pas Y raccourci et q entier et pair;
— un pas Y raccourci et q entier et impair;
— un pas Y raccourci et q fractionnaire.

3° Les enroulements irréguliers.

Ces enroulements ont un écart angulaire entre phases Θ qui n'est pas rigoureusement égal à $2\,\pi/m$. Ils ne seront pas traités dans cet ouvrage.

4,2. Les enroulements triphasés réguliers.

Ces enroulements, identiques à ceux des moteurs asynchrones, sont reproduits dans plusieurs schémas de ces

moteurs. De ce fait, ils ne seront pas traités ici, sauf dans les derniers chapitres où quelques alternateurs à grand nombre de pôles (alternateurs hydrauliques) sont schématisés en représentation frontale.

Dans ces bobinages, l'écart angulaire entre phases est égal à :

$$2\,\pi/m, \text{ soit } 360^{o}/3 = 120^{o} \text{ électriques.}$$

Le coefficient de bobinage k_1 se calcule avec la formule générale :

$$k_1 = \frac{\sin\left(\frac{q\,\alpha}{2}\right)}{q \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)}$$

α = écart angulaire en degrés électriques, entre deux encoches consécutives.

4,3. Les enroulements triphasés semi-réguliers.

Dans ces bobinages, le coefficient de bobinage k_1 ne peut plus être déterminé par la formule générale utilisée pour les enroulements réguliers, car elle ne tient pas compte du raccourcissement éventuel du pas. Un deuxième coefficient intervient pour déterminer E_{eff} de l'alternateur.

Ce coefficient, nous l'appellerons « facteur de raccourcissement k_2 ».

1° Recherche de k_1 dans un bobinage à pas diamétral et q fractionnaire.

Pour calculer le coefficient de bobinage k_1 en partant de ces caractéristiques, on prendra, comme sujet de démonstration, le schéma de la *figure XVI-8*, qui représente une phase extraite de la *figure XII-14*. Une phase suffit, puisque les trois phases sont identiques.

Dans ce bobinage, Y est diamétral :

$$Y = \frac{30}{4} = 7{,}5 = \text{pas polaire.}$$

$q = \frac{30}{3 \times 4} = 2{,}5$ encoches par pôle et par phase (nombre fractionnaire).

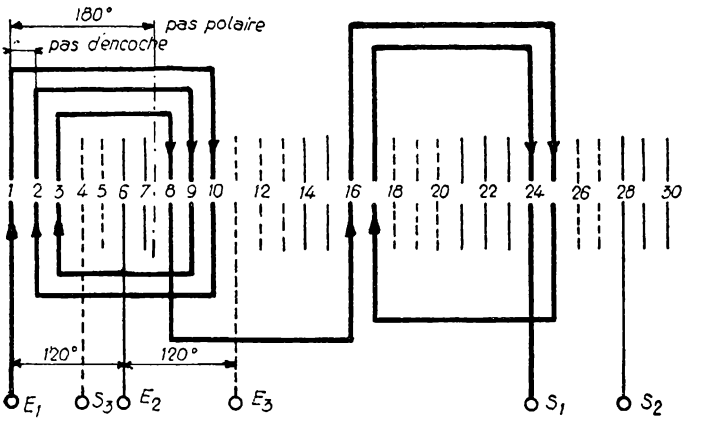


FIG. XVI-8. — La phase I de cette figure est extraite de la fig. XII-14 pour le calcul du coefficient de bobinage k_1 d'un enroulement semi-régulier à pas diamétral avec q fractionnaire. Elle concerne un stator triphasé tétrapolaire 30 encoches, dont deux pôles sont constitués par 3 encoches par phase, les deux autres pôles n'ayant que 2 encoches :

$$q = \frac{30}{4 \times 3} = 2{,}5.$$

La fig. XVI-9 montre le procédé employé pour la recherche de k_1.

Calcul du coefficient de bobinage k_1.

On trace un cercle divisé en autant de parties égales qu'il y a d'encoches par paires de pôles, soit en 15 parties, représentant les 15 premières encoches. L'encoche 16 se place au-dessus de l'encoche 1 et ainsi de suite jusqu'à 30.

Comme les pôles n'ont pas tous le même nombre d'encoches, on opère sur la phase entière, comme suit :

1) On commence par tracer les vecteurs correspondant aux faisceaux de la *figure XVI-8* qui sont affectés d'une flèche ascendante : soit les faisceaux 1, 2, 3, 16, 17, et l'on marque ces vecteurs d'une flèche.

2) Comme les vecteurs 16 et 17 sont superposés aux vecteurs 1 et 2, on ajoute une flèche en plus à ces deux derniers.

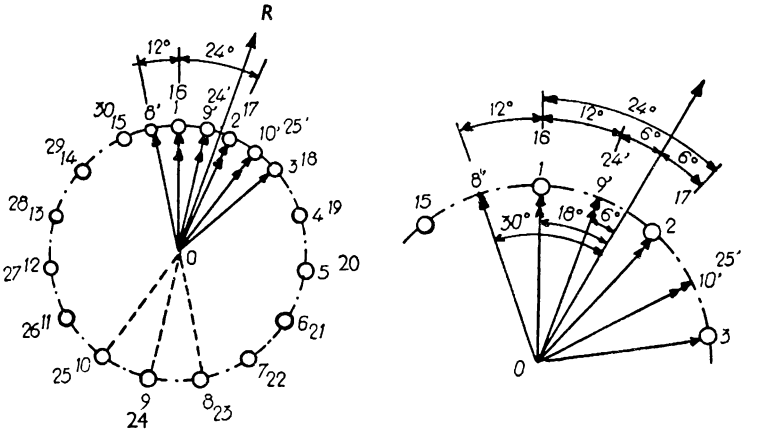


FIG. XVI-9. — Les commentaires concernant ces deux figures sont donnés dans le chapitre des enroulements triphasés semi-réguliers. Le coefficient de bobinage k_1 calculé ici est celui de la fig. *XVI-8*. Il a pour valeur le quotient de la somme des cosinus compris entre la ligne médiane R et les 3 vecteurs placés à sa gauche, d'où.:

$$k_1 = \frac{2 \cos 6^\circ + 2 \cos 18^\circ + \cos 30^\circ}{5}$$

$$k_1 = \frac{(2 \times 0{,}994\,5) + (2 \times 0{,}951) + (0{,}866)}{5} = 0{,}951.$$

3) Les encoches 8, 9, 10, 24 et 25 sont affectées d'une flèche descendante sur la *figure XVI-8*, et les vecteurs correspondants devraient partir du centre 0 pour aboutir aux encoches précitées.

Pour le calcul du coefficient k_1, nous dirigerons les vecteurs dans le prolongement de $8 \rightarrow 0$, $9 \rightarrow 0$, $10 \rightarrow 0$, ce qui nous donne 8', 9' et 10' que nous dotons d'une flèche.

Il reste à tracer les vecteurs des encoches 24 et 25, mais comme ils correspondent aux vecteurs 9' et 10' déjà tracés, il suffit de les doter d'une seconde flèche.

4) ***On trace une médiane R qui partage les vecteurs en deux parties égales,*** ce qui permet de calculer les cosinus des angles des 3 vecteurs placés à gauche ou à droite de R.

5) Le coefficient de bobinage k_1 a pour expression :

$$k_1 = \frac{2 \cos 6^o + 2 \cos 18^o + \cos 30^o}{5} = 0{,}951.$$

Le cos 30° correspondant au vecteur 8′ n'est affecté que d'une flèche. Les deux autres vecteurs ont 2 flèches chacun, d'où leur multiplication par deux. k_1 est donné par la moyenne des cinq cosinus.

Diagramme vectoriel du coefficient k_1.

En reprenant les vecteurs de la *figure XVI-9*, on constate que l'on a, dans ce diagramme :

6 vecteurs concourants, déphasés entre eux, dont les longueurs sont proportionnelles au déphasage entre les conducteurs d'une phase.

La résultante de ce diagramme est donnée par la *figure XVI-10* et le coefficient de bobinage k_1 est alors :

$$k_1 = \frac{AG}{AB + BC + CD + DE + EF + FG}.$$

Mais, comme le diagramme est symétrique par rapport à DR, on peut écrire :

$$k_1 = \frac{AR}{AB + BC + CD}$$

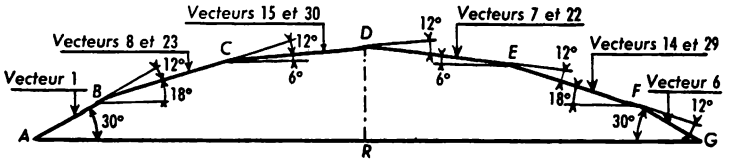


FIG. XVI-10. — Diagramme vectoriel du coefficient $k_1 = 0{,}951$ se rapportant aux figures XVI-8 et XVI-9.

soit : $\dfrac{\cos 30^o + 2 \cos 18^o + 2 \cos 6^o = 0{,}951}{5}$.

Pour la construction du diagramme, il faut se reporter au schéma placé à droite sur la *fig. XVI-9*, où on relève,

à gauche de la ligne médiane, un angle de 30°, deux de 18° et deux de 6°. Ces deux derniers ont chacun un vecteur marqué de deux flèches.

2° Bobinage à pas raccourci, avec q entier et pair.

Généralités.

On emploie souvent les enroulements à pas raccourci pour supprimer l'influence de l'un ou de l'autre des harmoniques du champ inducteur (1).

Si l'on désigne par T le pas polaire et par T' le pas de l'enroulement, on se rend compte de cette propriété en examinant la *figure XVI*-12 où est dessinée une spire S raccourcie de 1/3 du pas, ce qui donne :

$$T' = \frac{2}{3} T.$$

Lorsque le pas de l'enroulement est diamétral $T' = T$ les F.E.M. induites dans les deux côtés de la spire s'ajoutent algébriquement. On les représente par les vecteurs OA et OB et leur somme est égale à AB.

Lorsque le pas est raccourci d'une certaine valeur, les deux F.E.M. ne sont plus en phase; leur résultante AC est la somme géométrique de OA et de OC et le facteur de raccourcissement est par conséquent

$$k_2 = \frac{AC}{AB} \text{ (fig. XVI-12).}$$

Alors que le coefficient de bobinage k_1 tient compte des F.E.M. individuelles des inducteurs induits, le facteur

---

(1) **Une courbe périodique de courant alternatif** est représentée par la somme de plusieurs courbes sinusoïdales.

Si t est la période de la courbe considérée, les sinusoïdes composantes comprennent une sinusoïde de même période appelée sinusoïde fondamentale et des sinusoïdes identiques situées respectivement à $\frac{t}{2}$, $\frac{t}{3}$, $\frac{t}{4}$, etc..., que l'on appelle harmoniques.

de raccourcissement k_2 est fonction du raccourcissement du pas des bobines et la valeur de la F.E.M. par phase est donnée par la formule :

$$E_{eff} = 2{,}22\, k_1 k_2 N f \Phi \text{ volts.}$$

Φ est exprimé en webers.

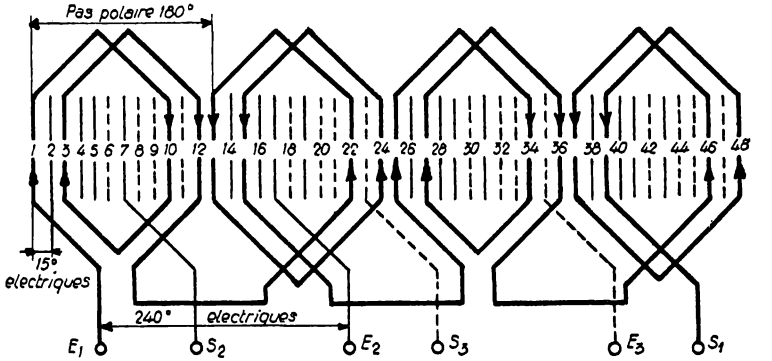


FIG. XVI-11. — Schéma d'une phase de l'enroulement semi-régulier (au pas raccourci) d'un stator triphasé comportant 48 encoches, 4 pôles, 1 faisceau par encoche, 4 encoches par pôle et par phase. Ecart angulaire entre encoches :

$$\alpha = \frac{360 \times 2}{48} = 15° \text{ électriques.}$$

Pas des sections raccourci de 1 à 10.

Pour trouver k_1 on trace une médiane entre les encoches 12 et 13, au centre du pôle et l'on a, entre cette médiane et l'encoche 12, un écart angulaire de 7°30′ ; puis, entre la médiane et l'encoche 10, un écart de 37°30′, soit :

$$k_1 = \cos 7°30' + 37°30' = \frac{0{,}991 + 0{,}793}{2} = 0{,}892.$$

Avec un enroulement à pas diamétral (voir figure *XII*-35) les pôles de chaque phase occupent 4 encoches consécutives, ce qui donne un coefficient k_1 meilleur, soit :

$$k_1 = \frac{\cos 7°30' + \cos 22°30'}{2} = 0{,}957.$$

4,4. Coefficient de bobinage et pas raccourci

Dans les enroulements polyphasés normaux, les conducteurs sont disposés symétriquement, de façon que les décalages angulaires de chaque phase soient égaux.

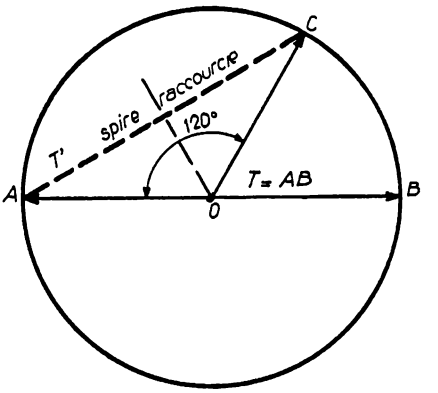


FIG. XVI-12. — Calcul du facteur de raccourcissement k_2 d'un bobinage d'alternateur dont on a raccourci le pas des bobines de 1/3 :

$$k_2 = \frac{AC}{AB} = \frac{2\,OA \sin \frac{\pi}{2} \frac{T'}{T}}{2\,OA} = \sin \frac{\pi}{2} \frac{T'}{T}.$$

Il résulte de ce qui précède que les enroulements à un faisceau par encoche, à nombre entier d'encoches par pôle et par phase, ne peuvent être réalisés qu'à pas diamétral.

La F.E.M. de deux conducteurs équidistants de 180° électriques s'ajoutant algébriquement, ***les conducteurs des phases d'un bobinage à courant alternatif peuvent être réunis dans un ordre quelconque,*** sans qu'il y ait lieu d'appliquer un coefficient dû au raccourcissement du pas, si l'on tient compte du décalage des spires comme il est dit plus haut.

Les bobinages dont le pas est raccourci d'une quantité supérieure au raccourcissement normal (cas de la petite polarité d'un enroulement à deux polarités, par exemple), font exception.

Le pas raccourci permet de réduire le volume des têtes de bobines dans les enroulements imbriqués. Par contre, il est d'un avantage moindre dans les enroulements ondulés, où le fait de raccourcir la section provoque un allongement des connexions opposées.

Avec un bobinage à deux faisceaux par encoche, le raccourcissement amène un décalage entre les conducteurs disposés dans les couches inférieures et supérieures. Les F.E.M., dans les faisceaux qui forment la section, ne sont plus en phase ; elles sont décalées d'un angle x dû au raccourcissement du pas, de sorte que l'on doit tenir compte du coefficient de bobinage k_1 et du facteur de raccourcissement k_2.

Ce cas s'applique surtout aux bobinages des alternateurs qui se font généralement à deux faisceaux par encoche. En effet, dans ces enroulements les conducteurs d'un certain nombre d'encoches peuvent appartenir à deux phases différentes. (Voir *fig. XII*-53).

En triphasé, le raccourcissement du pas ne doit pas dépasser $\frac{2\pi}{6}$, sauf à de rares exceptions.

4,5. Recherche du coefficient k_1 d'un enroulement à pas raccourci.

Pour effectuer cette recherche, on prendra la *fig. XVI*-11 comme exemple.

Dans ce schéma, une seule phase est représentée. Il s'agit d'un stator triphasé de 48 encoches à un faisceau par encoche, 4 pôles, soit :

$$N = 48, \quad m = 3, \quad 2\pi = 4, \quad q = 4$$

$$\alpha = \frac{360 \times 2}{48} = 15^\circ \text{ électriques entre encoches.}$$

$Y = 9$, soit 0 à 9 ou 1 à 10.

Le pas est raccourci, car avec un pas diamétral on aurait :

$Y = 11$. (Voir *fig. XII*-35).

Les 4 bobines d'une phase sont réparties également sur le stator et décalées de 180° entre elles.

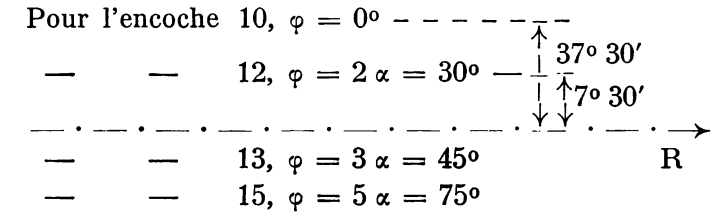
De ce fait, pour calculer le coefficient de bobinage k_1 de cet enroulement, il suffit de prendre comme base les 4 faisceaux d'un pôle d'une même phase.

En se reportant à la *figure XVI-11*, on choisira les encoches 10 - 12 - 13 - 15 pour déterminer k_1.

Les 4 pôles de chacune des phases étant identiques, il ne sera pas nécessaire d'avoir recours à une représentation vectorielle comme la *figure* XVI-9, mais simplement à un diagramme dont les 4 vecteurs ont la même longueur.

1° Calcul du coefficient k_1 avec un pas raccourci.

En choisissant l'encoche 10 comme point de départ, les déphasages entre les 4 faisceaux du pôle sont les suivants :



α = écart angulaire entre 2 encoches, soit ici : 15°.

Entre les encoches 12 et 13 le déphasage est de 15°.

Entre les encoches 10 - 12 et 13 - 15, le déphasage est de 30° chaque fois.

Le coefficient de bobinage k_1 a pour valeur :

$$k_1 = \frac{AR}{AB + BC} = \frac{\cos 37° 30' + \cos 7° 30'}{2}$$

$$= \frac{0{,}793 + 0{,}991}{2} = 0{,}892.$$

(Voir le diagramme de la *figure XVI-13*).

2° Calcul du coefficient k_1 d'un enroulement régulier à pas diamétral.

En reprenant le stator 48 encoches, 4 pôles, de l'exemple précédent, mais en le bobinant au pas diamétral $Y = \frac{48}{4} = 12$, soit 0 à 11 (voir *fig. XII*-35), on constate que l'on a 4 encoches consécutives bobinées par pôle et par phase.

Le décalage entre faisceaux d'un même pôle est de 15°.

L'enroulement est du type régulier et son coefficient peut se calculer avec la formule générale, ce qui donne :

$$k_1 = \frac{\sin\left(\frac{q\,\alpha}{2}\right)}{q \sin\left(\frac{q\,\alpha}{2}\right)},$$

soit :

$$q\,\frac{\alpha}{2} = 4 \times \frac{15}{2} = 30° \quad \text{d'où} \quad \sin q\,\frac{\alpha}{2} = 0{,}5$$

$$\frac{\alpha}{2} = 7° 30' \quad \text{d'où} \quad q \sin \frac{\alpha}{2} = 4 \sin 7° 30' = 0{,}522$$

soit : $$k_1 = \frac{0{,}5}{0{,}522} = 0{,}957.$$

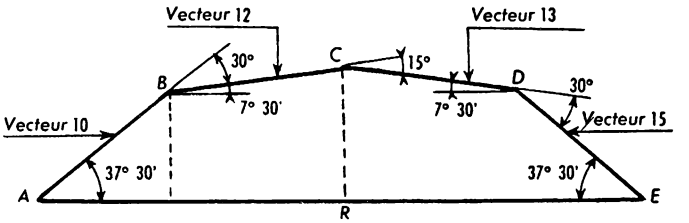


FIG. XVI-13. — Diagramme vectoriel du coefficient $k_1 = 0{,}892$ d'un enroulement à pas raccourci se rapportant à la figure XVI-11. Lire sa réalisation dans le sous-chapitre 4,5 à 1°.

3° Variante pour la recherche de k_1, avec un pas diamétral.

La démonstration peut également se faire avec un dia-

gramme vectoriel qui donne le même résultat, comme le démontre la *figure XVI*-14. En prenant le premier pôle de la première phase de la *figure XII*-35, on trouve, avec un écart angulaire α de 15° entre deux encoches :

Pour l'encoche 1, $\varphi = 0°$

— — 2, $\varphi = 1\,\alpha = 15°$ — 22° 30′

— — 3, $\varphi = 2\,\alpha = 30°$ — 7° 30′

— — 4, $\varphi = 3\,\alpha = 45°$ — R

Le coefficient de bobinage k_1 est :

$$k_1 = \frac{AR}{AB + BC} = \frac{\cos 22° 30' + \cos 7° 30'}{2} = 0{,}957.$$

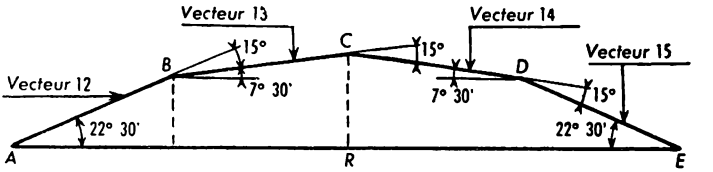


FIG. XVI-14. — Diagramme vectoriel du coefficient $k_1 = 0{,}957$ se rapportant au schéma de bobinage de la figure XII-35. Enroulement à pas diamétral.

4,6. Recherche de k_1 dans un bobinage à pas diamétral et q fractionnaire, avec 2 faisceaux par encoche.

En prenant comme exemple le bobinage de la *figure XVI*-15, on trace un cercle sur lequel on représente les 9 encoches du stator triphasé et on opère comme pour la *figure XVI*-9.

Calcul de k_1.

1) On choisit la phase 1 qui comporte les encoches 1 - 2 pour un pôle et 5 - 6 pour l'autre pôle.

2) On trace un vecteur pour chaque encoche et on le marque d'une flèche.

3) Les encoches 1 et 6 comprenant chacune 2 faisceaux de la phase 1 seront affectées de 2 flèches.

4) Les faisceaux des encoches 5 et 6 sont marqués de flèches descendantes. Pour le calcul de k_1, on dirige les vecteurs de ces encoches dans le prolongement de 5 → 0 et 6 → 0, ce qui donne 5′ et 6′ sur la figure.

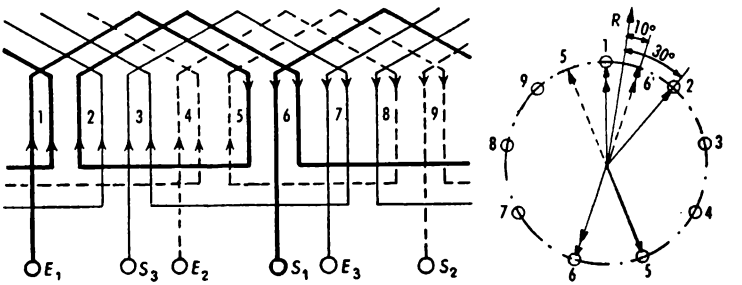


FIG. XVI-15. — Calcul du coefficient de bobinage k_1 d'un enroulement statorique triphasé bipolaire, 9 encoches, 2 faisceaux par encoche. Les encoches 2 - 5 - 8 reçoivent des faisceaux de phases différentes, qui devront être isolés en conséquence. Ecart angulaire entre 2 encoches : $x = 360/9 = 40°$.

$$k_1 = \frac{2 \cos 10° + \cos 30°}{3} = \frac{1{,}968 + 0{,}866}{3} = 0{,}944.$$

5) L'encoche 6 ayant 2 faisceaux, le vecteur 6′ sera affecté de deux flèches.

6) On trace la médiane R entre 5′ et l'encoche 2.

7) On recherche l'écart angulaire α entre 2 encoches, soit : $\alpha = 360/9 = 40$ degrés.

$$k_1 = \frac{2 \cos 10° + \cos 30°}{2} = \frac{1{,}968 + 0{,}866}{3} = 0{,}944.$$

4,7. Commentaires sur les bobinages réguliers et semi-réguliers.

En comparant les résultats obtenus par les divers calculs du coefficient de bobinage, on constate que k_1 est plus grand avec un pas diamétral qu'avec un pas raccourci.

En conséquence, on peut en déduire :

— qu'à égalité de flux magnétique, de vitesse et de nombre de conducteurs, la force électromotrice d'un alternateur est réduite dans le même rapport que le coefficient de bobinage.

Par contre, le raccourcissement du pas offre certains avantages.

Il permet :

— de réduire la longueur des têtes de bobines,

— de réduire le poids de cuivre et les pertes par RI^2,

— d'éliminer un harmonique capable de déformer la courbe de la force électromotrice d'un alternateur,

— de réduire l'amplitude des harmoniques et, par conséquent, leur pouvoir déformant.

4,8. Coefficients de bobinage pour machines à courant alternatif à nombre entier d'encoches par phase et par pôle.

Nombre d'encoches q	Monophasé 180° $C = \dfrac{1}{q \sin \dfrac{\pi}{2q}}$	Monophasé 120° $C = \dfrac{0{,}866}{q \sin \dfrac{\pi}{3q}}$	Triphasé 60° $C = \dfrac{0{,}500}{q \sin \dfrac{\pi}{6q}}$
1	1,000	1,000	1,000
2	0,707	0,866	0,966
3	0,666	0,844	0,960
4	0,653	0,837	0,958
5	0,647	0,833	0,957
6	0,643	0,832	0,956
7	0,642	0,831	0,955
8	0,641	0,830	0,955
9	0,640	0,829	0,955
10	0,639	0,829	0,955
11	0,639	0,828	0,955
12	0,638	0,828	0,955
∞	0,637	0,827	0,955

XVI,5. LE STATOR OU INDUIT D'ALTERNATEUR

Constitution.

L'induit, généralement appelé « stator », comporte un circuit magnétique constitué par une couronne de tôles au silicium de 0,4 ou 0,5 mm d'épaisseur.

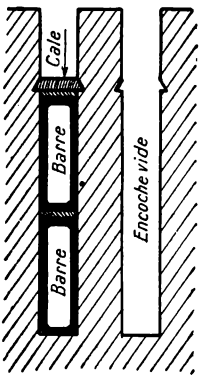


FIG. XVI-16. — Disposition du bobinage dans une rainure à fuite ouverte.

Sauf pour les petites machines, les tôles qui constituent la couronne sont rarement d'une seule pièce (en disques de tôle).

Au-dessus de 95 cm de diamètre, elles sont formées de segments superposés à joints alternés, dont le développement correspond généralement à deux pas polaires.

Ces tôles sont encochées intérieurement, afin de constituer, après assemblage, des rainures pour loger le bobinage.

Pour réduire les courants de Foucault dus aux variations alternatives du flux utile, on isole les tôles sur une ou deux faces (suivant l'importance du flux) par une couche de vernis.

Blocage des tôles.

Le blocage des tôles formant la couronne est obtenu par deux plateaux de serrage en acier, ou par des segments de plateaux pour les grands diamètres. Le tout est logé à l'intérieur d'une carcasse en tôle soudée qui donne à l'ensemble une grande rigidité.

Pour des raisons de transport, les grands alternateurs sont souvent construits en plusieurs éléments.

Refroidissement des stators.

Afin de faciliter l'évacuation de la chaleur produite par les pertes dans les tôles et par effet Joule dans la partie

de l'enroulement logée dans les rainures, on prévoit, dans la couronne magnétique, des canaux de ventilation.

Ces canaux, appelés « évents », sont obtenus par la division des tôles de la couronne en paquets de 5 à 6 cm d'épaisseur, espacés de 1 cm.

Le refroidissement est obtenu par le déplacement d'air provenant de la rotation de l'inducteur et des ventilateurs disposés aux extrémités du bobinage du rotor.

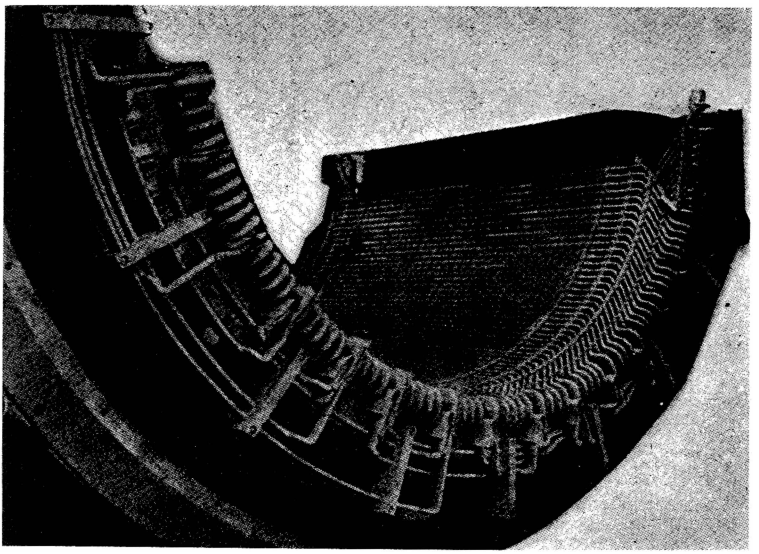


FIG. XVI-17. — Enroulement statorique d'un alternateur de 80 000 kVA, 13 kV, 500 tr/mn. Le stator est en deux pièces. Les têtes de bobines sont isolées au ruban micacé sur papier imprégné d'asphalte. Remarquer le calage des connexions des têtes des bobines. Document Oerlikon.

Forme des encoches.

Les encoches des stators d'alternateurs sont semi-fermées pour les machines à basse tension de faible puissance. Pour les grandes puissances et la haute tension, les rainures sont ouvertes et les dents sont prévues pour déborder largement de l'enroulement, surtout pour les turbo-alternateurs.

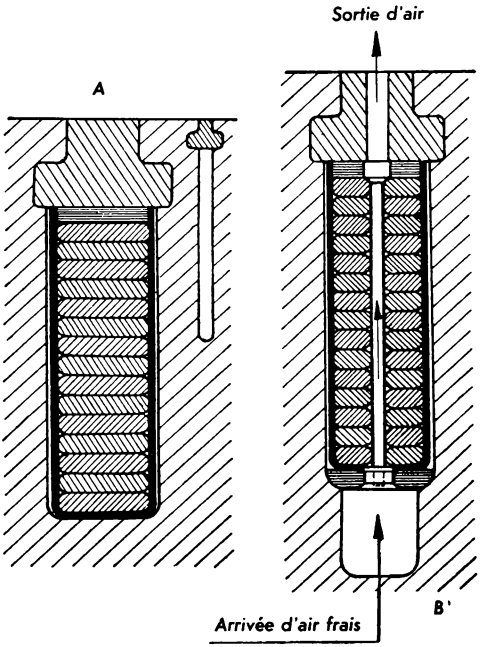


FIG. XVI-18. — Deux encoches bobinées de rotors de turbo-alternateurs. Dans l'encoche *A*, une seule rangée de barres plates. Dans l'encoche *B*, il est prévu un canal de ventilation entre les deux rangées de barres. L'alimentation en air frais est assurée par un canal axial, disposé sous le bobinage. Document Jeumont.

Cette particularité a pour effet d'augmenter les fuites magnétiques dans l'encoche, afin de diminuer l'importance des courants de court-circuit instantané et, par le fait même, réduire la puissance à couper par les disjoncteurs.

Serrage des têtes de bobines.

En cas de court-circuit, les efforts électrodynamiques entre les têtes de bobines de l'induit deviennent considérables et peuvent, dans certains cas, déformer les bobines. Pour y remédier, on serre fortement les têtes de bobines au moyen de cales, contre des anneaux de soutènement

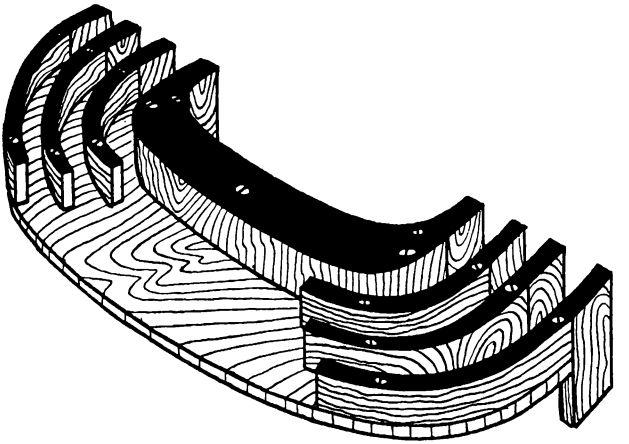


FIG. XVI-19. -- Gabarit en bois pour former les têtes de bobines dans un enroulement de gros alternateur à encoches semi-fermées et bobines en forme de U.

parfaitement isolés et maintenus par des supports fixés sur les plateaux de serrage des tôles (*fig. XVI-26*).

Généralités.

Le nombre d'encoches par pôle et par phase est souvent supérieur à deux; il y a intérêt à le prendre assez grand, mais on est parfois limité par la longueur de l'arc polaire.

Les petits alternateurs peuvent être réalisés avec les parties mécaniques d'un moteur asynchrone à rotor bobiné. L'inducteur, ou rotor, est alors constitué par un enroulement qui occupe les deux tiers seulement des encoches.

5,1. Bobinage des stators d'alternateurs

Le mode de bobinage employé pour l'enroulement des stators d'alternateur est du type « réparti » en tambour, à deux faisceaux de conducteurs par encoche.

Un enroulement est dit « réparti » lorsque les conducteurs d'une phase sont disposés dans deux, trois, quatre, etc... rainures sous un pôle.

Les bobines d'une même phase peuvent être groupées, soit en série, soit en deux ou plusieurs parties parallèles. Dans ce dernier cas, le nombre de dérivations est un sous-multiple du nombre des pôles.

Le bobinage des stators de petite puissance s'effectue au moyen de fils ronds. Celui des machines importantes se fait avec du cuivre méplat ou carré.

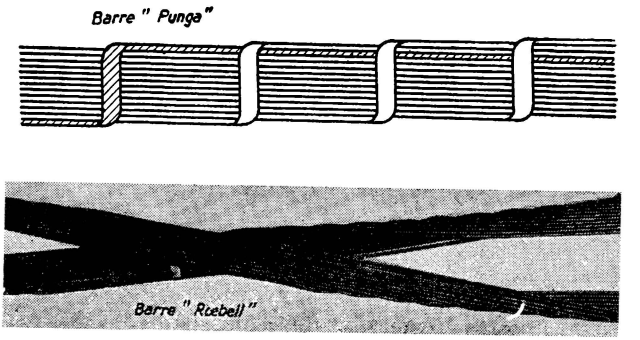


FIG. XVI-20. — Barre « Punga » utilisée pour l'enroulement des gros alternateurs, dans le cas de deux conducteurs par encoche. L'ensemble, qui ne forme qu'un conducteur, est divisé en un certain nombre de brins élémentaires méplats, isolés au papier les uns des autres. Avec cette disposition, chaque conducteur élémentaire occupe successivement toutes les positions dans l'encoche.

La figure du bas représente une barre « Roebel », variante de la barre « Punga ». Elle permet d'utiliser non seulement des fils méplats, mais également des fils ronds isolés à l'émail, ce qui facilite sa confection. La barre représentée ici est ouverte pour plus de compréhension.

Lorsque le débit de l'alternateur exige de grosses sections de cuivre, on place deux, trois ou quatre conducteurs en parallèle pour donner plus de souplesse aux bobines.

Une autre raison majeure intervient également en faveur de ce procédé : ***les flux de fuites d'encoches qui traversent les gros conducteurs engendrent des courants de Foucault dans leur masse,*** ce qu'il convient d'éviter.

5,2. Confection des barres de gros alternateurs

La hauteur des barres de cuivre nécessaires pour le bobinage des machines de grande puissance (turbo-alternateurs, alternateurs hydrauliques) est importante. Il en résulte des pertes électriques prohibitives, qu'il est indispensable de réduire.

Ces pertes se traduisent par des courants de Foucault d'une part et par des courants de circulation d'autre part.

Pour supprimer ces courants parasites, on divise les conducteurs en un certain nombre de conducteurs élémentaires, isolés les uns des autres, et en opérant un renversement de ces derniers au moyen des procédés « Punga » ou « Rœbel ».

Dans les machines importantes, ces pertes apparaissent aussi bien dans la partie de l'enroulement logé dans le fer que dans les connexions frontales.

Dans les machines de moyenne puissance, on se contente de transposer les barres dans la partie de l'enroulement logée dans le fer.

5,3. Les barres Rœbel et Punga

La barre « Rœbel » à fil rond se compose de deux demi-barres constituées chacune par des fils isolés et disposés à plat. On fait subir à chaque demi-barre une torsion, comme l'indique la *figure XVI-20*, puis on réunit les deux demi-barres en intercalant un ruban isolant séparateur, pour former une barre homogène.

Lorsqu'on utilise du cuivre méplat, chaque barre subit une torsion appropriée pour lui faire opérer un tour complet dans la traversée du fil de l'encoche et un demi-tour dans chaque demi-connexion, quand il s'agit de grosses machines, 50 MW par exemple.

On obtient le même résultat avec la barre « Punga », qui est plus rarement utilisée et qui tend à disparaître.

Avec cette disposition, chaque conducteur élémentaire occupe successivement toutes les positions dans l'encoche. Ainsi, les F.E.M. engendrées par les fuites sont les mêmes dans chacun des conducteurs élémentaires, ce qui empêche la création de courants de circulation entre eux.

FIG. XVI-21. — Barre à transposition, type Rœbel, pour l'enroulement statorique des gros alternateurs ou turbos. La barre est constituée par des éléments de cuivre méplat assemblés. Chaque élément parcourt un tour complet dans la traversée d'une encoche.

5,4. Isolation des barres d'alternateurs

Les barres d'enroulement du type Rœbel sont isolées avec soin. Tous les vernis qui entrent dans la composition de leur isolement sont à base de résine époxy.

Pour protéger les croisements lors des serrages qui donneront leur forme aux barres faites en cuivre méplat, on introduit sous chacun d'eux une bande de mica-silionne.

Le guipage est imprégné d'un vernis non stabilisé qui, en se polymérisant, va agglomérer les cuivres lors de leur moulage à chaud sous presses chauffantes.

Les barres destinées aux machines moyennes et petites reçoivent une isolation dite de structure, à capote, dans la partie droite placée dans les encoches seulement.

Les barres des grosses machines ont une « isolation continue ». C'est celle qui nous intéresse, le capotage ayant été traité dans d'autres chapitres.

Avec l'isolation continue, l'isolant est le même dans les parties droites et frontales. Le ruban utilisé est constitué par une ou plusieurs couches de mica blanc agglomérées par un vernis sur un support en silionne et intercalées entre deux supports en papier pelure japon.

Les barres ainsi traitées subissent en cours d'isolation une imprégnation sous vide et pression à chaque couche de ruban.

Un autre procédé d'isolation comporte un ruban de silionne - mica reconstitué - silionne. *L'agglomérant est une résine synthétique du type « Epoxy ».* Cette isolation ne nécessite pas d'imprégnation sous vide et pression.

Pour terminer, on recouvre l'isolant de la barre d'une couche de peinture conductrice sur toute la partie logée dans l'encoche. La surface de l'isolant en contact avec les tôles est transformée en surface équipotentielle de potentiel zéro.

Le champ n'est pas modifié dans l'isolant, mais il est annulé dans l'air compris entre l'isolant et les tôles, ce qui évite une tension disruptive possible qui percerait l'isolant.

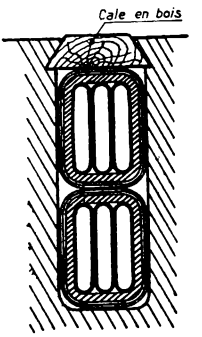


FIG. XVI-22. — Disposition de deux faisceaux de 3 conducteurs, chacun dans une encoche ouverte à queue d'aronde. La cale peut être en bois imprégné ou en permali.

5,5. Bobinage des stators à encoches ouvertes

Ce type d'encoche permet l'emploi de bobines gabariées diverses avec deux faisceaux par rainure.

Les bobines sont isolées et capotées, prêtes à la pose. Elles peuvent être conçues sous trois formes :

1° En bobines en manteau, comme pour les induits de machines à courant continu.

2° En bobines en forme de U, c'est-à-dire non fermées à une extrémité.

3° En faisceaux, pour les machines importantes, lorsque l'enroulement est ondulé en particulier.

L'isolement à la masse des conducteurs placés dans les encoches est généralement constitué par un tube en micafolium enroulé et pressé à chaud ; les développantes sont isolées au ruban mica recouvert de toile huilée ; les lamelles sont enrubannées à la soie micacée.

Le calage des développantes est fait par peignes et blochets, en matière isolante, maintenus par des tiges amagnétiques.

Ce calage est nécessaire pour tenir en place le bobinage, qui risquerait de se déformer sous l'effet d'un court-circuit franc aux bornes de l'alternateur.

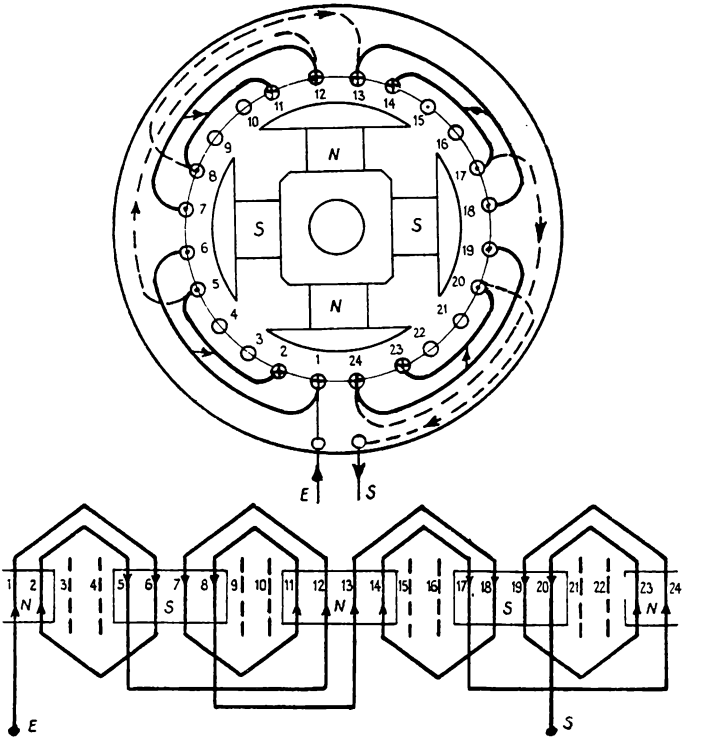


FIG. XVI-23. — Schémas, frontal et panoramique, d'un enroulement statorique d'alternateur monophasé à 4 pôles, 24 encoches, dont 16 bobinées. Bobinage à pôles alternés.

Les croix indiquent que le courant entre dans l'encoche, et les points qu'il en sort. Le bobinage du rotor n'est pas figuré.

Le bobinage des gros alternateurs peut s'effectuer avec des bobines en manteau sur le même principe que pour les induits de machines à courant continu.

La mise en place des bobines est délicate en raison de leur grande taille.

Afin de diminuer le risque d'un court-circuit entre spires dans la bobine durant la pose, certains constructeurs les chauffent à une température de 80°C afin d'assouplir l'isolant.

Ce type de bobine convient parfaitement pour les enroulements imbriqués appliqués aux alternateurs d'une puissance inférieure à 3 000 kVA.

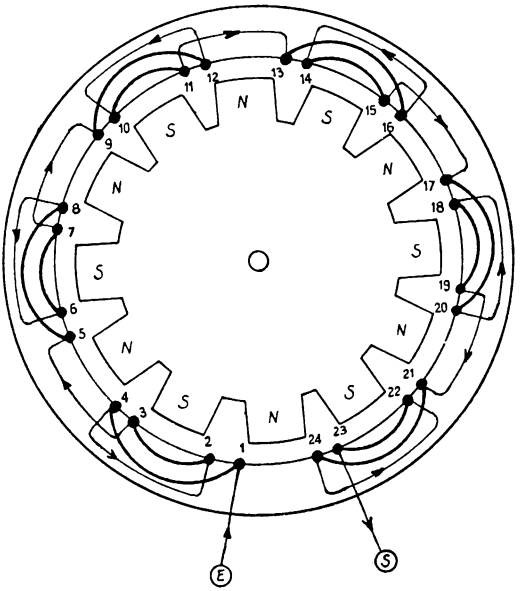


FIG. XVI-24. — Représentation frontale de l'enroulement d'un stator d'alternateur monophasé, 12 pôles, 24 encoches, 2 encoches par pôle, bobinage concentrique à pôles conséquents.

Bobinages des machines importantes.

Il s'effectue avec des bobines ouvertes d'un côté, que l'on soude lorsqu'elles sont en place sur le stator, au moyen de douilles spéciales dans lesquelles on enchevêtre les conducteurs élémentaires.

Lorsque la couronne a une très grande largeur et dans le cas d'enroulements ondulés, on utilise de préférence des barres sous forme de faisceaux.

On commence le bobinage en plaçant au fond de l'encoche tous les faisceaux inférieurs, puis on complète le remplissage des encoches par la deuxième couche qui comprend les faisceaux supérieurs.

On construit de gros turbo-alternateurs dont un sur trois des conducteurs élémentaires constituant la barre, est creux. Ce dispositif permet le refroidissement du bobinage par circulation d'eau dans les barres.

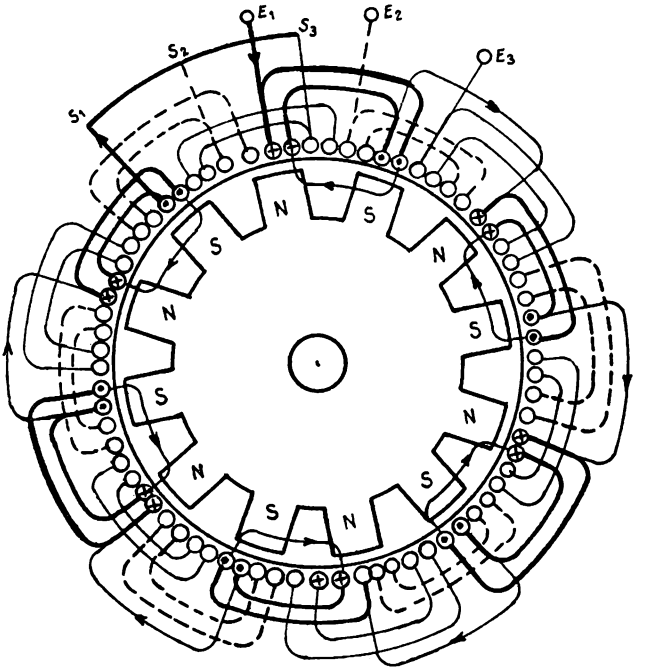


FIG. XVI-25. — Représentation par projection frontale du bobinage d'un induit d'alternateur triphasé, comportant 12 pôles, 2 encoches par pôle et par phase.

Les connexions entre bobines n'ont été faites que sur une phase, afin de ne pas alourdir le dessin. Les deux autres phases ont leurs bobines reliées exactement de la même façon.

Les têtes de bobines sont disposées sur deux plans et les trois sorties S_1, S_2 et S_3 sont reliées en étoile.

Liaison entre conducteurs.

Elle s'effectue au moyen de douilles en cuivre étamé dans lesquells on introduit les extrémités des conducteurs à relier, avant de les souder à l'étain. La brasure remplace de plus en plus la soudure.

Tous ces enroulements doivent être parfaitement serrés dans les encoches de façon à éviter tout cisaillement de l'isolant par suite des vibrations de la machine.

Blocage des bobines.

Il se fait au moyen de cales trapézoïdales en bois ou en permali, logées dans des queues d'aronde pratiquées dans les dents de la couronne. En outre, pour donner de la rigidité aux parties obliques des bobines, on cale celles-ci en introduisant entre elles des taquets en matière isolante.

A la sortie des capotes, l'isolement des faisceaux n'étant plus aussi important, il se produit des effluves qui tendent à se fermer sur la couronne magnétique.

Pour empêcher ce retour, on installe entre les capotes, à 10 cm de la couronne, des « pare-effluves », constitués par un râteau isolant en carton bakélisé.

On désigne sous le nom d'effluve une décharge d'électricité sans étincelle qui est parfois visible dans l'obscurité.

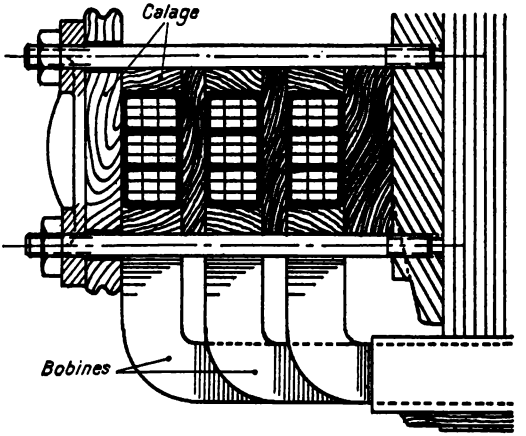


FIG. XVI-26. — Amarrage des têtes de bobine sur un alternateur à grande puissance.

5,6. Bobinage avec encoches semi-fermées

On utilise ce genre d'encoches lorsque l'enroulement ne comporte qu'un faisceau par rainure.

Les conducteurs employés sont ronds pour les petits alternateurs et carrés pour les machines importantes. Ces derniers remplissent mieux l'espace de l'encoche et sont de ce fait préférés aux ronds.

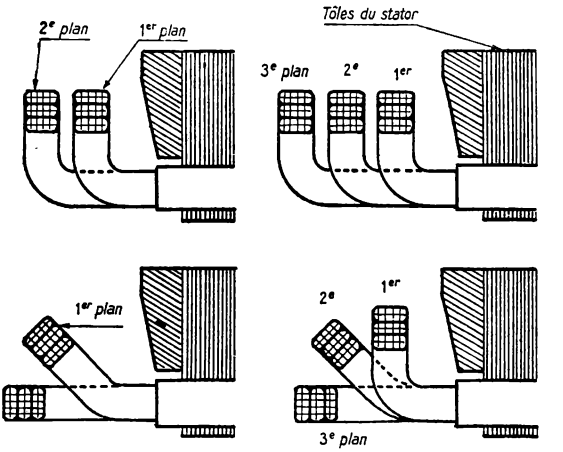


FIG. XVI-27. — Dispositions réalisées avec les têtes de bobines formées sur gabarits dans le cas de bobinage à fils passés.

Les figures de gauche donnent les positions des bobines, que l'on peut réaliser avec un enroulement sur deux plans. Les figures de droite montrent les positions possibles avec disposition sur trois plans. (Enroulements statoriques).

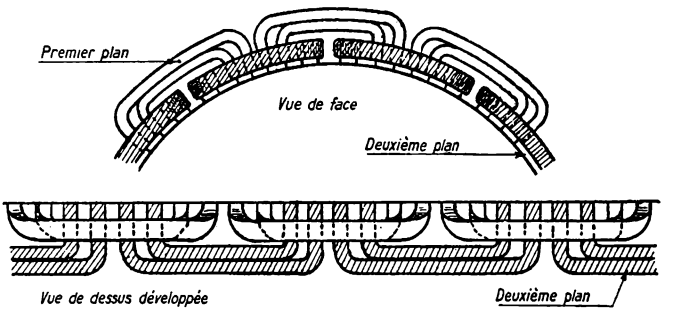


FIG. XVI-28. — Disposition frontale et développée des têtes de bobines d'un stator à bobines concentriques disposées sur deux plans.

Le premier plan doit être relevé suffisamment pour dégager l'emplacement du deuxième.

Les enroulements à un faisceau par encoche n'ont pas des bobines identiques, sauf toutefois pour les stators monophasés où les têtes de bobines sont disposées sur le même plan.

Les têtes de bobines des alternateurs diphasés sont placées sur deux plans, celles des stators triphasés sont étagées sur deux ou trois plans, selon le genre d'enroulement employé.

XVI,6. INDUCTEUR OU ROTOR D'ALTERNATEUR

6,1. Constitution

Le système inducteur des alternateurs est généralement mobile. Il comporte un certain nombre de pôles formés

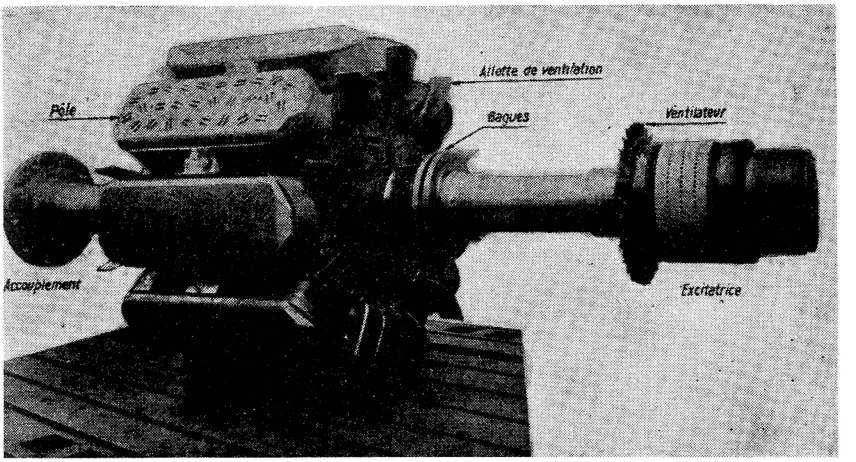


FIG. XVI-29. — Rotor d'alternateur de 8 000 kVA, 4 500 V, 50 Hz, 600 tr/mn, pour accouplement avec turbine hydraulique (Document ALSTHOM).

Les noyaux polaires sont vissés sur le moyeu. L'alimentation des bobines est assurée par l'excitatrice disposée en bout d'arbre. On remarque également les deux bagues d'acier servant à relier électriquement les bobines à l'excitatrice, par l'intermédiaire de balais et de câbles.

par des bobines convenablement reliées entre elles, de façon à réaliser un ensemble inducteur alterné. Le bobinage inducteur est alimenté avec du courant continu compris entre 35 et 250 volts.

Les noyaux polaires.

Les noyaux polaires autour desquels on place les bobines sont constitués, selon le type d'alternateur, par un bloc massif d'acier coulé, par un ensemble de tôles, ou par un bloc d'acier rainé pour les turbo-alternateurs.

Les noyaux polaires en acier coulé massif sont à épanouissement polaire rapporté. Celui-ci est fixé sur le noyau au moyen de vis ou avec une queue d'aronde en saillie, la femelle de l'assemblage étant faite dans l'épanouissement.

Dans la plupart des cas, les noyaux polaires sont construits avec des tôles magnétiques de 2 à 3 mm d'épaisseur,

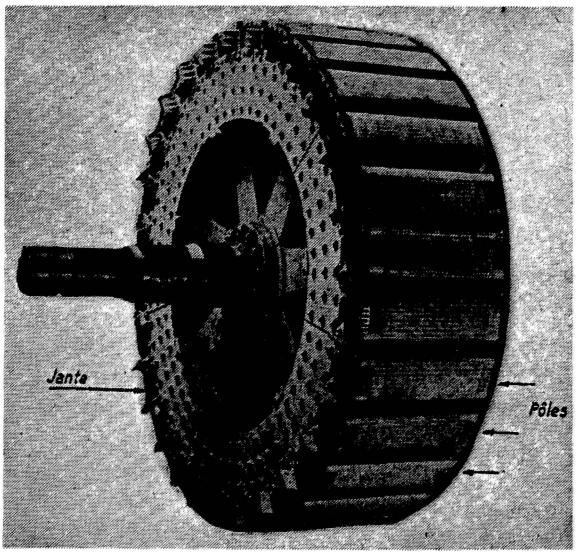


FIG. XVI-30. — Rotor d'alternateur sur jante, de 28 pôles saillants, destiné à un stator de 35 500 kVA à 214 tr/mn, 50 Hz (Document ALSTHOM, Belfort).

découpées à l'étampe et rivées entre elles. Ces pôles ont l'avantage d'avoir des épanouissements homogènes découpés avec le noyau et d'offrir moins de pertes parasites que le noyau massif.

Les épanouissements polaires.

La forme des épanouissements est étudiée pour réaliser une répartition correcte du champ dans l'entrefer, en vue d'obtenir une F.E.M. se rapprochant de la sinusoïde.

6,2. Alimentation des bobines inductrices des alternateurs

L'alimentation des bobines des pôles inducteurs se fait en courant continu basse tension, 35 à 250 V.

Cette alimentation peut provenir de sources variées.

Le courant d'excitation peut être fourni par une dynamo classique fixée en bout d'arbre de l'alternateur.

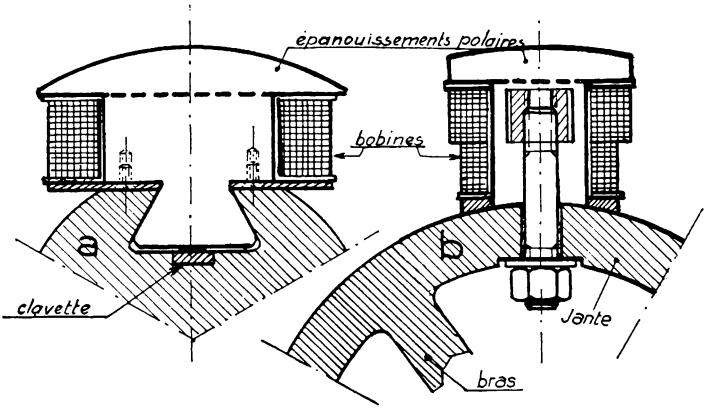


FIG. XVI-31. — La figure (*a*) de gauche représente un pôle claveté sur la partie prismatique aménagée au milieu de l'arbre du rotor. Dans certaines machines, la queue d'aronde est remplacée par un T ou un double T.

Pour les rotors comportant un grand nombre de pôles, ces derniers se fixent sur une jante (*b*) supportée par des bras qui s'appuient sur un tambour claveté sur l'arbre.

L'alimentation des bobines des pôles inducteurs se fait par l'intermédiaire de deux bagues en bronze ou en acier, sur lesquelles s'appuient des balais reliés à l'excitatrice.

Actuellement, on s'oriente vers des dispositifs statiques plus souples, qui remplacent les dynamos. Un de ces systèmes, déjà mis en exploitation, est constitué par un pont triphasé de redresseurs contrôlés pilotés par un dispositif de commande de grilles.

D'autre part, on construit actuellement des petits alternateurs jusqu'à 10 kW, dont les inducteurs sont des aimants en Alnico orienté. En redressant le courant débité par ces alternateurs au moyen de thyratrons secs, on peut exciter l'excitatrice principale d'un gros alternateur.

6,3. Les rotors d'alternateurs à pôles saillants

Leur vitesse d'emballement.

La construction des inducteurs dépend essentiellement de la vitesse périphérique maximum à l'emballement, du nombre de pôles et de l'importance de la masse rotorique qui sert également de volant à la machine qui entraîne l'alternateur.

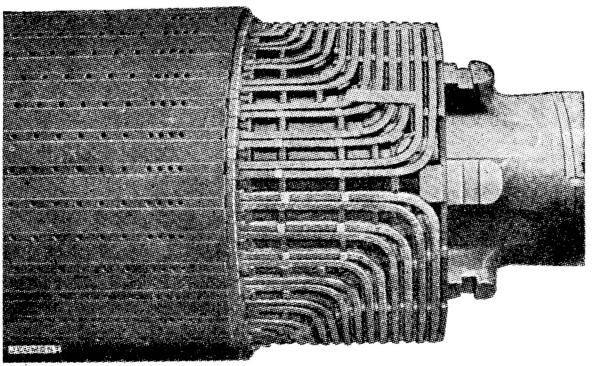


FIG. XVI-32. — Têtes de bobines du rotor d'un turbo-alternateur bipolaire de 72 MVA, avant la fixation du tambour qui doit maintenir le bobinage en place lors de la rotation (Document Forges et Ateliers de Jeumont, Nord).

On appelle vitesse d'emballement, la vitesse qui correspond à l'emballement des turbines en cas de décharge brusque du secteur d'utilisation.

Constitution des rotors.

Dans les rotors à **quatre, six** et **huit** pôles, l'arbre est en acier forgé avec une partie prismatique usinée en son milieu, pour y recevoir les pôles inducteurs. Ceux-ci, généralement en tôles assemblées, sont fixés sur l'arbre par une queue d'aronde ou par des tenons en T clavetés.

Lorsque l'alternateur comprend de **dix** à **quatorze** pôles, ces derniers sont fixés dans une jante ou culasse, constituée par des disques épais en acier coulé ou en acier forgé, montés à chaud sur l'arbre et clavetés sur celui-ci. Fig. *XVI*-31 *b*.

Dans les alternateurs comprenant un grand nombre de pôles, ceux-ci sont fixés sur une jante en disques d'acier laminés et ajourés, clavetés sur l'arbre.

La jante des inducteurs dont le diamètre atteint 4 m est constituée par des segments de tôles de 2 à 3 mm d'épaisseur, enchevêtrées et assemblées par un grand nombre de broches. L'ensemble est supporté par des bras qui prennent leur appui sur un moyeu claveté sur l'arbre.

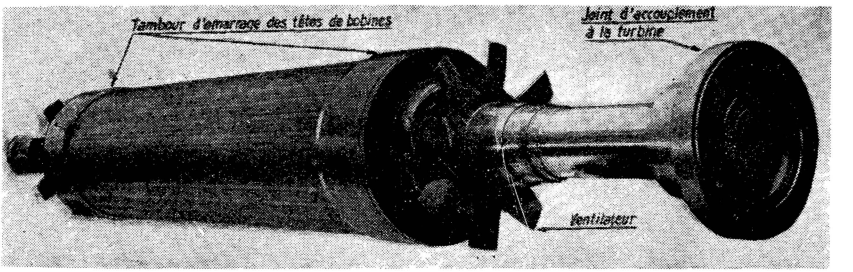


FIG. **XVI**-33. — Inducteur lisse de turbo-alternateur Alsthom de 25 000 kVA à 3 000 tr/mn. Les extrémités du bobinage sont solidement maintenues par un tambour. Le bobinage est constitué par des barres de cuivre méplat logées dans des rainures fraisées dans la masse du cylindre. Les faisceaux sont maintenus en place par des cales en bronze.

6,4. Les rotors de turbo-alternateurs

Les rotors de ces alternateurs sont massifs, l'arbre et la partie magnétique ne forment qu'une seule pièce. On les désigne sous le nom de « rotors lisses ».

Bobinage.

L'enroulement est disposé dans des encoches fraisées dans la partie magnétique et solidement maintenu en place au moyen de cales en bronze.

Les parties frontales de l'enroulement **sont protégées** par une frette amagnétique contre les effets de la force centrifuge.

Les turbo-alternateurs sont à deux ou quatre pôles, ce qui donne des vitesses de 3 000 et 1 500 tr/mn pour une fréquence de 50 Hz.

XVI,7. BOBINAGE DES INDUCTEURS OU ROTORS D'ALTERNATEURS

Principe.

Pour les petites machines, il est constitué par du fil de cuivre rond ou méplat, disposé en plusieurs couches, que l'on enroule sur une forme qui a le profil des noyaux polaires.

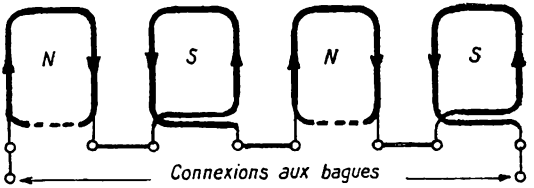


FIG. XVI-34. — Disposition des pôles sur un rotor d'alternateur **à pôles saillants.** Les sorties sont croisées à l'intérieur d'une bobine sur deux.

Les pôles des machines importantes à pôles saillants sont faits avec du cuivre nu enroulé sur champ, isolé par une bande d'isolant collé.

Les bobines sont serrées à chaud, à la presse hydraulique, et solidement fixées sur les noyaux polaires.

Ces précautions sont nécessaires en raison de l'effort produit par la force centrifuge lorsque le moteur tourne.

Un tassement du bobinage aurait pour effet de détruire l'équilibrage du rotor et de le faire vibrer. L'isolant finirait par se cisailler et des courts-circuits seraient à craindre.

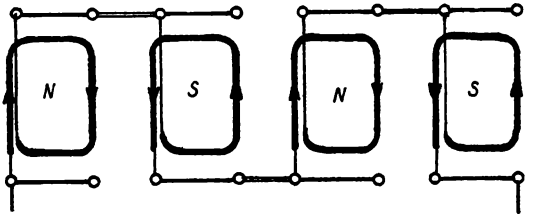


FIG. XVI-35. — Les pôles du rotor de l'alternateur sont formés de bobines identiques. Les connexions et sorties sont disposées de part et d'autre des pôles **saillants.**

Isolement des bobines avec la masse.

Il est obtenu au moyen de chemises et de cadres en leathéroïd, en presspahn et d'isolants divers résistant mieux à la chaleur, tels que la micanite.

Les extrémités des bobinages sont solidement arrêtées sur le moyeu de l'inducteur par des vis isolées de la masse. Ces vis reçoivent d'autre part les connexions entre pôles et entre pôle et bague à l'entrée et à la sortie du bobinage.

Bobinage d'un pôle de turbo-alternateur.

Il est constitué par une bande de cuivre enroulée à plat en spires superposées.

Parallèlement à la bande de cuivre, on enroule un ruban isolant collé.

La bande de cuivre est formée, avant la pose, à son profil définitif. Le bobinage s'effectue en égrenant spire par spire la bobine dans les encoches. Pour effectuer ce travail, on suspend la bobine au-dessus du rotor et l'on place les spires couche par couche dans les encoches avec toutes les précautions désirables.

7,1. Montage des bobines inductrices d'alternateurs à pôles saillants

Les bobines inductrices disposées sur les rotors d'alternateurs doivent fournir alternativement un pôle nord et un pôle sud. D'autre part, les connexions entre bobines doivent être rigides et courtes en raison de l'action exercée par la force centrifuge lorsque le rotor tourne.

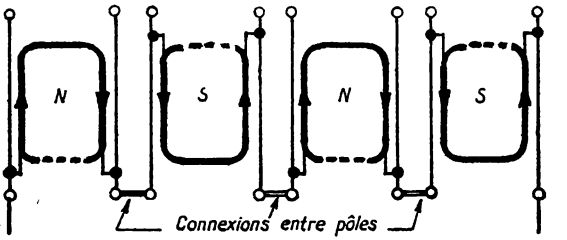


FIG. XVI-36. — Les pôles de ce rotor d'alternateur sont constitués par des bobines identiques, retournées alternativement à la mise en place. Chaque bobine comporte 4 bornes, ce qui permet de faire des connexions à volonté de part et d'autre des bobines destinées à former des pôles saillants.

Trois procédés doivent être envisagés pour réaliser ces conditions :

1° Le croisement des sorties d'une bobine sur deux se fait à l'intérieur.

De ce fait, les bobines ne sont pas toutes identiques. Il y a lieu de faire un repère à l'un des types de bobines et de veiller, lors du montage, à alterner l'ordre de celles-ci.

2° Les bobines sont construites d'une façon identique. Les sorties sont disposées de part et d'autre du pôle. Les connexions entre bobines se font alternativement à l'avant et à l'arrière, comme l'indique la *figure XVI-35*.

3° Avec ce procédé, les bobines sont toutes semblables; il suffit de les retourner alternativement en les plaçant sur les noyaux polaires. Les connexions entre bobines se font du même côté pour tous les pôles (*fig. XVI-36*).

CHAPITRE XVII

LES TRANSFORMATEURS

XVII,1. THÉORIE ÉLÉMENTAIRE DES TRANSFORMATEURS

1,1. Fonctionnement d'un transformateur

Si l'on relie le bobinage primaire d'un transformateur au réseau, il en résulte un courant alternatif qui donne naissance à un flux de même fréquence, dans le circuit magnétique.

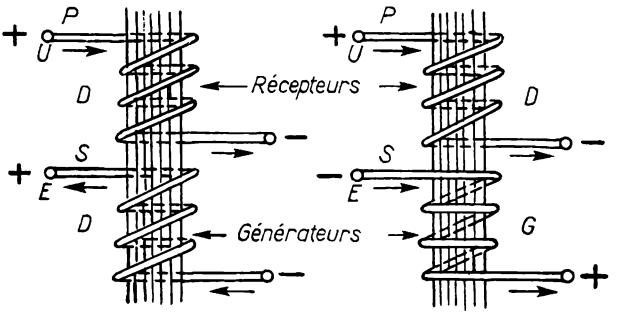


FIG. XVII-1. — Exemples de polarités instantanées dans un transformateur pour des bornes homologues. Dans les deux dessins, la tension instantanée U, dans les primaires P, est de même sens. Dans le dessin de gauche, les deux bobines sont enroulées à droite D. Les polarités sont les mêmes du fait que S est générateur et P récepteur; par contre, les tensions sont de sens inverse.

Dans le dessin de droite, on a le primaire P enroulé à droite D et le secondaire S enroulé à gauche G. De ce fait, les polarités sont opposées. Ceci démontre l'importance du sens de l'enroulement des bobines.

Sous l'influence de ce flux variable, une force électromotrice variable de même fréquence va prendre naissance dans les spires du bobinage secondaire.

Dans une spire du primaire, la f.é.m. induite par le flux du circuit magnétique est opposée à la tension primaire du réseau : c'est une force contre-électromotrice.

Dans une spire de l'enroulement secondaire, c'est une force électromotrice, car elle s'ajoute aux f.é.m. induites dans les autres spires du secondaire.

En supposant qu'il n'y ait pas de fuite magnétique dans le fer, la tension efficace U_2 au secondaire est :

$$U_2 = \frac{\omega \Phi N_2}{\sqrt{2}} \text{ volts}$$

N_2 = nombre de spires du secondaire;

Φ = flux magnétique maximal dans le fer, en webers;

ω = $2 \pi f$ (pulsation du courant) soit $2 \times 3{,}14 \times 50 = 314$ pour un courant de 50 hertz.

Pour une fréquence de 50 Hz, une induction maximale $\beta = 1$ tesla et une section de fer de 100 cm², la f.é.m. produite dans une spire est :

$$E = \frac{314 \times 1 \times 0{,}01}{\sqrt{2}} = 2{,}22 \text{ volts.}$$

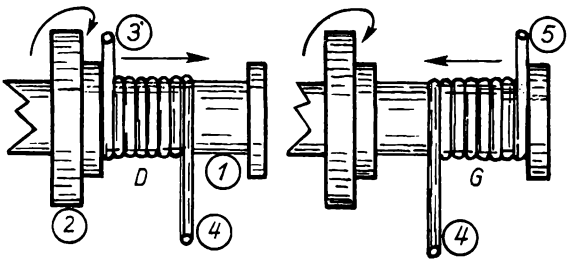


FIG. XVII-2. — L'enroulement des bobines des transformateurs s'effectue sur un mandrin (1) fixé sur un plateau (2) entraîné par un tour. En *D*, on a un enroulement « à droite »; le bobinage débute à (3) pour aboutir à (4), au dévidoir. En *G*, l'enroulement est dit « à gauche »; il débute à (5). Les spires s'enroulent comme un filet de vis à gauche.

1,2 Rapport de transformation

Dans la théorie élémentaire du transformateur, on considère un appareil parfait, dans lequel les résistances des bobines sont nulles, les fuites magnétiques et la réluctance du circuit magnétique sont également nulles.

Si l'on désigne par N_1 le nombre de spires du bobinage primaire et N_2 le nombre de spires de l'enroulement secondaire, on a :

$$\propto = \frac{N_1}{N_2}$$

qui donne le rapport de transformation théorique du transformateur.

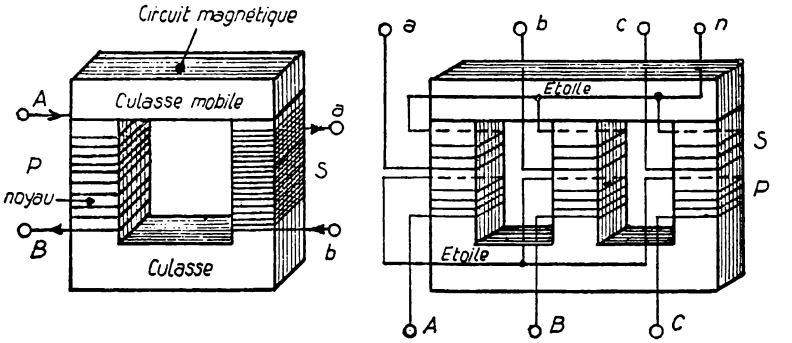


FIG. XVII-3. — Le dessin de gauche représente un circuit magnétique de transformateur monophasé et ses deux bobinages, primaire *P* et secondaire *S*.

Le dessin de droite montre un transformateur triphasé, avec ses enroulements, primaire et secondaire, couplés en étoile. *P* est relié au réseau par les bornes *A*, *B*, *C*. Le secondaire *S* dont le neutre est sorti de l'étoile, se branche sur l'utilisation.

Les tensions aux bornes du primaire et du secondaire sont, entre elles, dans le même rapport que le nombre de spires primaires et secondaires :

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} = \propto$$

U_1 et U_2 sont des tensions prises lorsque le transformateur est à vide.

Le rapport de transformation ne diffère pas plus de 1 % du rapport théorique dans ce cas.

Lorsque U_1 et U_2 sont des tensions prises en charge, le rapport de transformation $\frac{U_1}{U_2}$ surpasse de 4 à 5 % le rapport $\frac{N_1}{N_2}$.

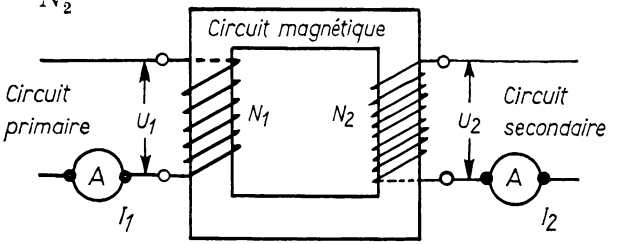


FIG. XVII-4. — Schéma théorique d'un transformateur monophasé.

Il en ressort que, pour une même tension primaire U_1, la tension secondaire U_2 est plus faible en charge qu'à vide. Cette chute de tension provient de la résistance ohmique des enroulements primaires et secondaires et des fuites de flux dans le circuit magnétique, lorsque la charge augmente.

Sens du flux dans les enroulements.

L'enroulement secondaire produit, dans le circuit magnétique du transformateur, un flux de sens contraire, à celui du flux primaire qui l'a engendré. Cette opposition est d'autant plus importante que le courant augmente dans les bobinages.

Il en résulte qu'une partie du flux primaire contourne les bobines secondaires sans y pénétrer, d'où une perte de f.é.m. dans celles-ci.

1,3. Un transformateur est auto-régulateur

A vide, la puissance absorbée par un transformateur est très réduite, le courant qu'il absorbe est appelé courant magnétisant.

Le circuit primaire se comporte comme une bobine à faible résistance, mais à inductance propre très importante.

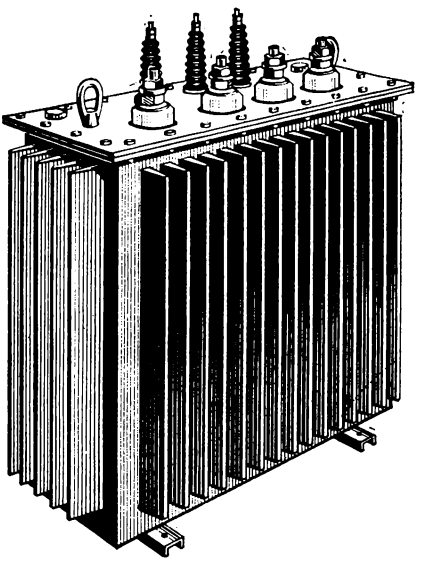


FIG. XVII-5. — Vue d'un transformateur triphasé à refroidissement dans l'huile. On remarque, sur le couvercle, trois petites bornes basse tension + le neutre. Au deuxième plan sont les trois bornes H.T. Autour de la cuve, sont disposées des ailettes qui augmentent la surface de refroidissement au contact de l'air. Document Deri.

L'intensité I_1, absorbée par le circuit primaire, est très faible, juste suffisante pour entretenir l'aimantation du circuit magnétique. D'autre part, le décalage du courant I_1 sur la tension U_1 est voisin de 1/4 de hertz, d'où un facteur de puissance très faible et une puissance absorbée par le transformateur peu importante.

En charge, le secondaire est auto-régulateur.

Lorsque l'impédance du circuit d'utilisation décroît, l'intensité I_2 augmente dans le circuit secondaire.

Ce phénomène est général; à tout instant, le flux dû au courant secondaire s'oppose aux variations du flux primaire qui donne naissance à ce courant et crée un deuxième flux dirigé en sens inverse.

Ce courant est démagnétisant; il diminue l'aimantation du noyau magnétique et par suite l'inductance propre du primaire qui, soumis à la même tension, est traversé par un courant I_1 progressivement plus important.

$$N_1 I_1 = N_2 I_2.$$

D'une façon générale, le rapport du courant primaire au courant secondaire est égal au rapport inverse des nombres de spires de la bobine primaire et de la bobine secondaire.

En réalité, $N_2 I_2$ est plus faible de 2 à 5 % que $N_1 I_1$ en raison des pertes de transformation.

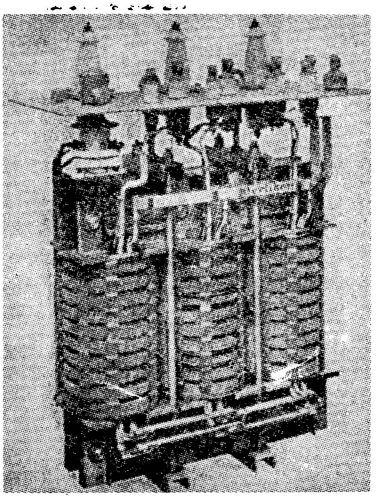


FIG. XVII-6. — Intérieur d'un transformateur triphasé à bain d'huile. Les trois grosses bornes se relientà la ligne H.T. Le bobinage est constitué par des galettes espacées qui permettent un meilleur refroidissement.

1,4. Rendement

Toutes les pertes du transformateur étant mesurables, on peut exprimer le rendement vrai de cet appareil :

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{\text{Puissance secondaire}}{\text{Puissance secondaire} + \text{pertes totales}}.$$

La puissance active débitée au secondaire par un transformateur dépend du facteur de puissance du circuit d'utilisation.

Les pertes dans un transformateur résultent des courants de Foucault et de l'hystérésis dans les tôles.

Ces pertes sont sensiblement égales à vide ou en charge pour une fréquence et une tension constantes.

Les pertes par effet Joule sont proportionnelles au carré de l'intensité apparente dans chacun des enroulements.

XVII,2 LES TRANSFORMATEURS STATIQUES BOBINÉS

2,1. Généralités

Les transformateurs sont des appareils statiques à induction, destinés à transformer un système de courant alternatif en un autre système de courant alternatif, d'intensité et de tension différentes. Ils sont inutilisables en courant continu.

Les transformateurs, dont aucun organe n'est mobile, se construisent selon leur destination, en monophasé ou en polyphasé.

Un transformateur est dit « élévateur » lorsqu'il fournit au secondaire une tension plus élevée que celle qu'il reçoit au bobinage primaire. ***Il est dit « abaisseur »*** dans le cas contraire. Les transformateurs sont réversibles.

L'ensemble des bobines, inductrice et induite, enroulées sur un circuit magnétique, constitue un transformateur.

Le circuit inducteur s'appelle le « primaire », le circuit induit, le « secondaire ».

L'enroulement qui compte le moins de spires est nommé enroulement « basse tension »; l'autre est l'enroulement « haute tension ».

Influence de la fréquence du réseau sur un transformateur.

Un transformateur construit pour une fréquence de 25 Hz peut être utilisé sans inconvénient à la fréquence

de 50 Hz. Par contre, un transformateur construit pour fonctionner à la fréquence de 50 Hz risque de s'échauffer dangereusement sur un réseau à 25 Hz.

2,2. Constitution générale d'un transformateur

Un transformateur comprend :

1° ***Un circuit magnétique fermé,*** en tôles d'acier minces assemblées de telle sorte que les entrefers soient réduits au minimum.

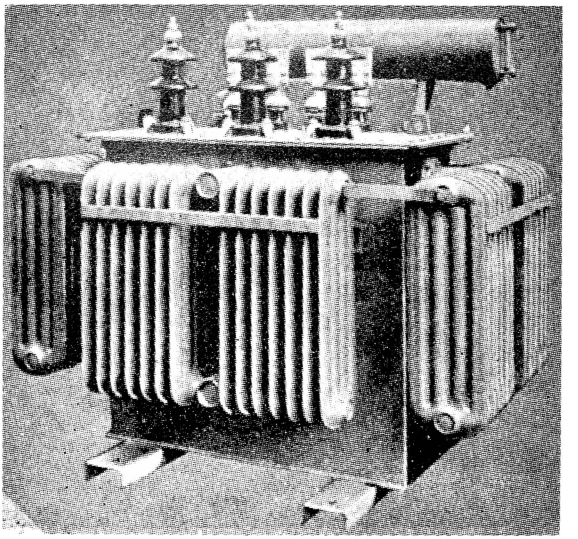


FIG. XVII-7. — Transformateur triphasé avec son conservateur d'huile (le cylindre en second plan). Les bornes B.T. sont cachées par les trois bornes H.T. au premier plan. On remarque les radiateurs de refroidissement à ailettes disposés sur le pourtour.
L'appareil est construit pour une puissance de 160 kVA et une tension primaire de 20 kV. Document Unelec.

2° ***Un enroulement primaire et un enroulement secondaire.***

Ces deux enroulements (sans contact électrique entre eux) sont répartis sur les noyaux du circuit magnétique. Ils ont toujours des nombres de spires différents.

3° ***Les accessoires,*** qui comprennent généralement :

— la cuve en tôle mince,

— le couvercle avec les bornes : primaire, secondaire et neutre,

— l'huile de refroidissement, ou du pyralène,

— un conservateur d'huile et un dessiccateur d'air contenant une matière déshydratante, telle que le gel de silice.

Le dessiccateur est surtout employé lorsque le transformateur est au pyralène, en raison de sa masse spécifique 1,6 (plus dense que l'eau).

Toute l'humidité entrant dans le transformateur se condense et se dépose sur la surface du pyralène, d'où risque d'amorçage si le niveau du pyralène se trouve à la hauteur des connexions H.T.

XVII,3. LE CIRCUIT MAGNÉTIQUE

3,1. Constitution

Elle diffère, selon qu'il s'agit d'un transformateur monophasé (2 ou 3 colonnes), ou triphasé (3 colonnes).

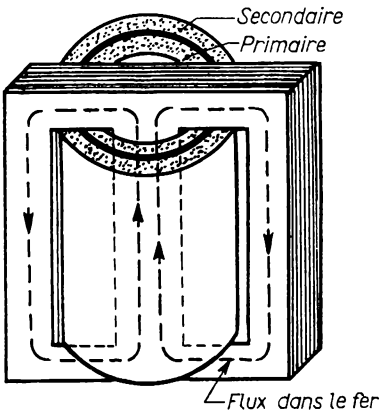


FIG. XVII-8. — Transformateur monophasé cuirassé.

Les transformateurs monophasés sont généralement à deux colonnes, mais ils sont à trois colonnes lorsqu'ils sont du type cuirassé (pour les petits modèles).

Dans ces derniers, le bobinage se place sur le noyau central, de sorte qu'il est complètement enveloppé par le circuit magnétique, ce qui réduit au maximum les pertes de flux.

Les transformateurs triphasés possèdent trois colonnes qui servent de support aux trois phases du bobinage.

Les circuits magnétiques des transformateurs sont composés de tôles de faible épaisseur, à coefficient d'hystérésis réduit et à grande résistivité. Ces tôles sont en acier doux à 4 % de silicium et leur épaisseur varie de 0,35 à 5 mm selon la destination et l'importance du transformateur.

3,2. Préparation des tôles

Deux techniques sont jusqu'à présent utilisées pour la constitution des circuits magnétiques :

1° ***la plus ancienne consiste à découper et poinçonner les tôles,*** puis éliminer les bavures par meulage, en faisant passer les tôles entre deux rouleaux, dont l'un, côté bavures, est abrasif. Les tôles sont ensuite vernies et passées au four pour polymériser le vernis.

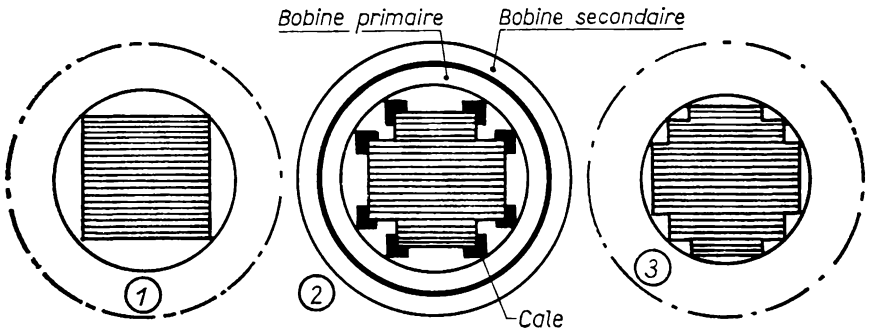


FIG. XVII-9. — Trois coupes de noyaux de circuits magnétiques. Celui du milieu est ceinturé par ses bobines, primaire et secondaire, que six cales isolantes, disposées sur la longueur du noyau, centrent et isolent du fer.

Pour ces tôles, laminées à chaud, les pertes par kilogramme, pour une induction de 1 tesla (1Wb/m²) et 50 hertz, varient avec la qualité choisie, de 1,3 à 1,1 watt et au mieux à 0,9 W.

2° ***la deuxième méthode consiste à laminer les tôles à froid,*** pour obtenir des cristaux orientés, de façon que le flux circule dans le sens du laminage.

Pour cela, on doit tenir compte, lors du découpage et de l'assemblage des tôles, de l'orientation des cristaux.

L'isolation entre tôles élémentaires est assurée par un revêtement minéral (carlite), capable de résister au recuit nécessaire après les opérations de découpage et de poinçonnage.

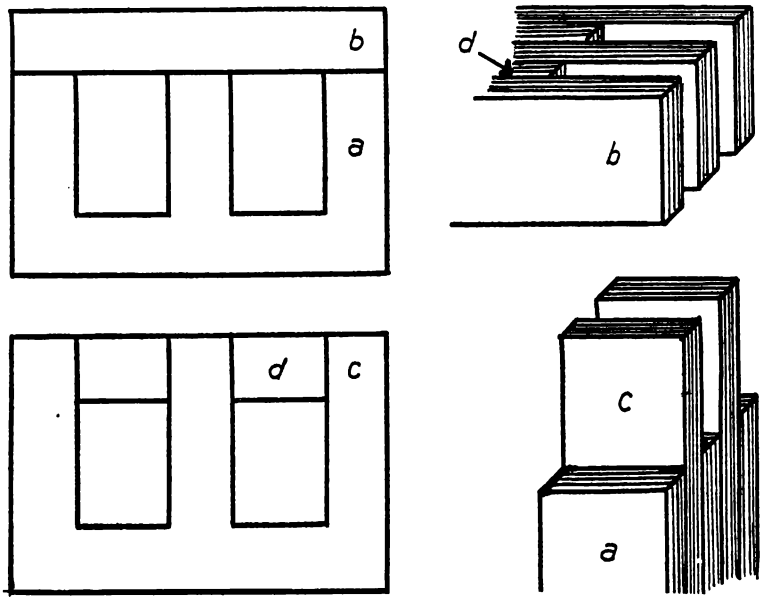


FIG. XVII-10. — A gauche, deux plans de la disposition adoptée pour former un circuit magnétique enchevêtré de transformateur triphasé. Seule la culasse supérieure est mobile; la culasse inférieure et les colonnes sont d'un seul tenant. La culasse supérieure n'est mise en place qu'après la pose des bobines sur les noyaux. Les tôles sont assemblées par paquets, puis enchevêtrées, comme l'indique le dessin de droite.

Les pertes par kilogramme de tôles sont alors de l'ordre de 0,5 à 0,6 watt, pour une induction de 1 tesla à 50 hertz, dans le sens du laminage.

3,3. Assemblage et serrage des circuits magnétiques

Les joints enchevêtrés sont obtenus en alternant chaque entrefer avec une tôle continue.

Les culasses sont serrées au moyen de boulons s'appuyant sur des flasques en fer. Les noyaux, à partir d'une certaine puissance, sont recouverts d'une tôle maîtresse en acier ordinaire, séparée du circuit magnétique par des intercalaires isolants épais. Le tout est serré à l'aide de boulons, isolés du circuit magnétique par un tube en bakélite.

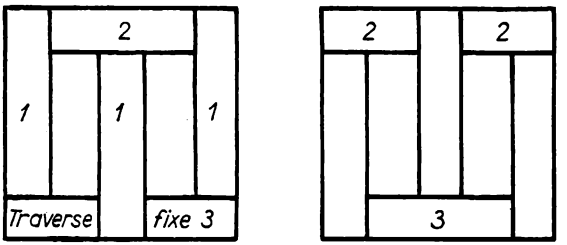


FIG. XVII-11. — Variante de la figure précédente pour montrer un circuit magnétique de transformateur triphasé. Les tôles sont disposées par petits paquets (de 4 à 10 tôles) que l'on alterne pour former les colonnes (1) et les traverses (2 et 3). On obtient ainsi des joints enchevêtrés. Les traverses mobiles (2) ne sont mises en place que lorsque l'enroulement est disposé sur les trois noyaux. Les joints devront être aussi faibles que possible pour faciliter le passage du flux magnétique.

Les boulons de serrage peuvent être remplacés par un ruban à base de fibres de verre et de résine de polyester, que l'on enrubanne fortement autour des noyaux et culasses. Ce procédé est déjà utilisé avec succès outre Atlantique. En France, certains fabricants commencent à utiliser ces rubans pour le frettage des induits de dynamos.

XVII,4. ENROULEMENT DES TRANSFORMATEURS

4,1. Disposition des enroulements

Les deux enroulements, primaire et secondaire, sont constitués par des bobines réparties sur les noyaux, de façon que le flux qui traverse un enroulement traverse l'autre. Le sens de l'enroulement doit être le même pour toutes les bobines afin d'avoir des flux additifs dans les noyaux.

Les bobines, basse et haute tension, peuvent être soit alternées, soit concentriques.

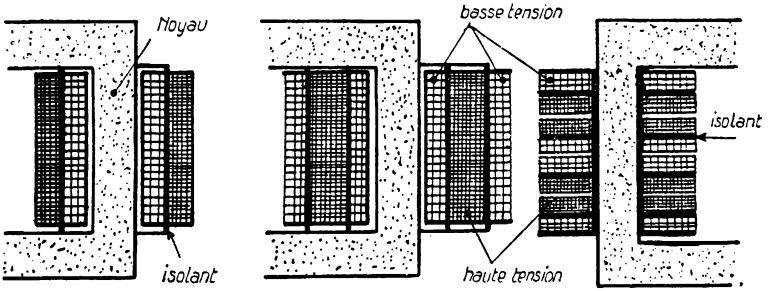


FIG. XVII-12. — La figure de gauche comprend deux enroulements concentriques. Le dessin central est à enroulement concentrique, mais la B.T. est séparée en deux, avec au centre la bobine H.T. Dans le dessin de droite, on a un enroulement à galettes, alterné B.T. et H.T. Les extrémités B.T. comportent des demi-bobines.

4,2. Enroulement en galettes alternées.

Ce procédé n'est utilisé qu'en basse et moyenne tension, jusqu'à 6 000 V pour l'air et 15 000 V pour l'huile.

Les bobines sont constituées par des galettes de fil enrubannées pour résister à la tension de fonctionnement. Ces galettes haute et basse tension sont alternativement disposées le long du noyau magnétique isolé par un tube ou des cales.

Ces bobines sont en outre séparées entre elles par des cales (généralement en bois) maintenues par un frettage en ficelle, ou par l'enrubannage d'une galette.

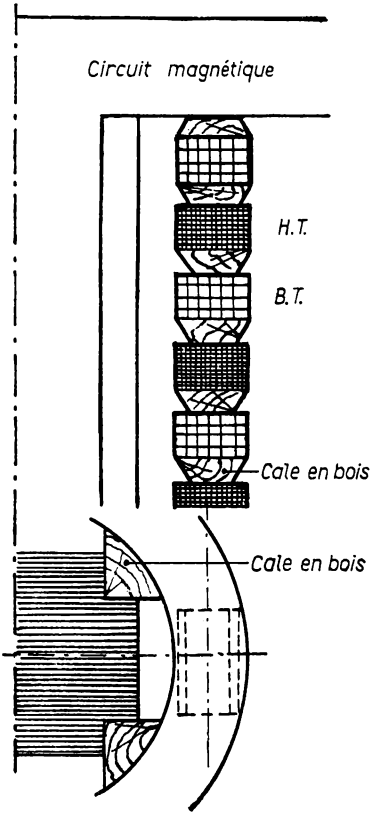


FIG. XVII-13. — Bobinage partiel d'une colonne de transformateur. L'enroulement est du type à galettes B.T. et H.T. alternées et séparées entre elles par des cales en bois. Ces cales sont maintenues par le ruban isolant les galettes, ou par une frette en ficelle. Des cales en bois isolent également, du fer, l'enroulement sur toute la longueur des colonnes.

On est limité dans l'importance de cet isolement par l'échauffement conservé par l'enrubannage. Quant aux cales, leur dimension doit être aussi réduite que possible,

afin d'avoir une chute de tension inductive admissible et une perte de place acceptable.

L'isolement entre bobines alternées peut également se faire par des disques en matière isolante, sur lesquels figurent des tasseaux qui ménagent, entre les galettes, des canaux de refroidissement pour la libre circulation de l'huile.

Dans les bobines H.T., la différence de potentiel entre deux couches superposées ne doit pas dépasser 100 V pour les transformateurs à refroidissement par air, et 150 V pour ceux qui utilisent l'huile.

L'enroulement des galettes se fait sur un tour muni d'un changement de vitesse, commandé par une pédale. Un gabarit en bois, en matière isolante, ou métallique, fixé sur le plateau du tour, sert de support au bobinage.

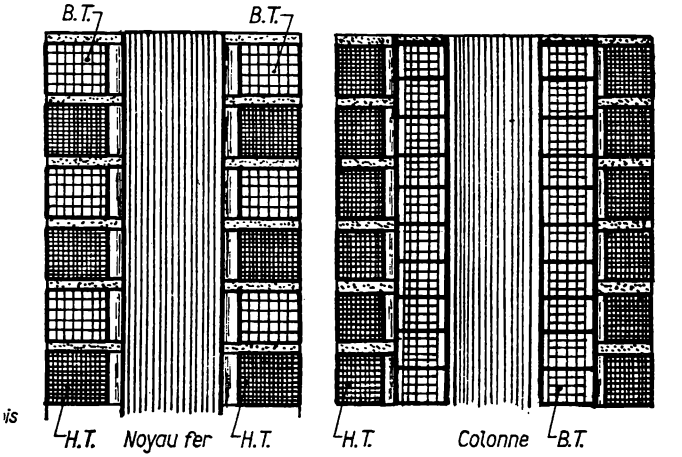


FIG. XVII-14. — Deux dispositions possibles des bobines sur un noyau magnétique. A gauche, les galettes sont alternées B.T.-H.T. et séparées par un disque isolant supportant des tasseaux, entre lesquels l'huile peut circuler. A droite, l'enroulement est concentrique. La B.T. est enroulée sur un tube en matière isolante et rigide, sous forme de galettes séparées par des joues en isolant. La H.T. comporte des galettes isolées entre elles par des tasseaux, permettant la circulation de l'huile. La séparation entre B.T. et H.T. et entre B.T. et fer est constituée par des tubes isolants rigides épais.

L'isolement classique des conducteurs est constitué par du coton, du papier, de l'émail, et plus récemment par des émaux synthétiques de grande qualité.

Les bobines, une fois réalisées, sont imprégnées sous vide, puis passées au séchage et au préserrage. Dans d'autres cas, la bobine entière est enrobée dans un moulage de résine époxy, durcie au four.

4,3. L'enroulement concentrique

1° Enroulement concentrique des bobines basse tension.

Cet enroulement s'exécute en couches successives sur des tubes en matière isolante, ou sur un mandrin en bois, en tenant compte de l'isolant qu'il recevra dans ce dernier cas.

Dans les bobinages concentriques, l'enroulement B.T. (gros fil) peut s'effectuer avec du fil rond ou méplat sur toute la hauteur des noyaux.

Quand il s'agit de fortes intensités, on est amené à adopter un enroulement à plusieurs conducteurs en paral-

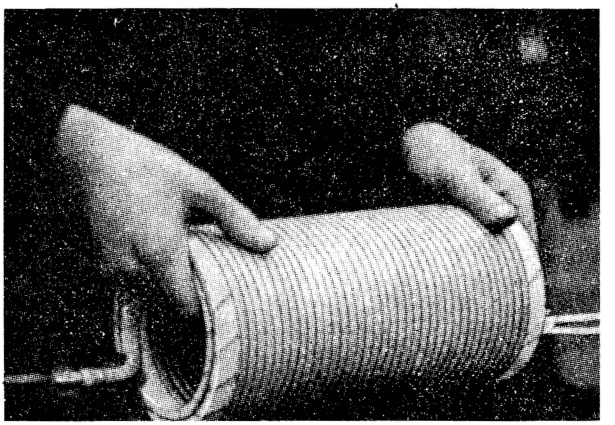


FIG. XVII-15. — Bobine B.T. à encoulement concentrique exécuté en fil méplat isolé mécaniquement au papier. On remarque que les dernières spires sont reliées entre elles par un ruban pour éviter leur déroulement.

lèle. Ce procédé permet de limiter les courants de Foucault qui prendraient naissance dans des conducteurs trop importants.

Les couches sont séparées soit par un isolant, soit par un canal de refroidissement pour les puissances importantes.

L'enroulement B.T. se place autour du noyau magnétique, isolé de celui-ci par son support en tube isolant. Dans d'autres cas, la B.T. est maintenue à distance du noyau par des cales ou des baguettes isolantes qui laissent circuler l'huile entre fer et bobinage.

2° Enroulement concentrique haute tension.

Il se fait sur un cylindre isolant qui enveloppera le circuit B.T. sur toute la hauteur d'un noyau.

Les galettes en fil rond sont bobinées avec interposition de papier ou de toile entre couches.

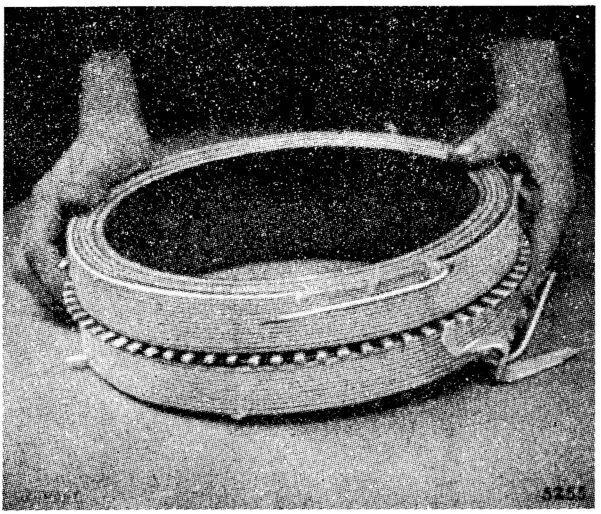


FIG. XVII-16. — Deux galettes en fil rond, séparées par un disque isolant muni de tasseaux favorisant la circulation de l'huile entre les bobines. Document Jeumont.

La qualité de ces isolants est fonction de la différence de potentiel qui existe entre ces couches.

Les galettes d'extrémités, reliées au réseau, doivent avoir un isolement renforcé pour résister aux surtensions transitoires susceptibles de se produire en service.

Entre les galettes, on intercale un disque isolant supportant des tasseaux qui servent à ménager des canaux de refroidissement. Pour éviter toute connexion à l'intérieur de ces canaux radiaux, une bobine sur deux est enroulée en sens inverse.

Le réglage axial du cylindre H.T. sur la B.T. est obtenu au moyen de réglettes isolantes, formant des canaux qui assurent la circulation de l'air ou de l'huile de refroidissement.

XVII,5. LES TRANSFORMATEURS MONOPHASÉS

5,1. Constitution générale.

Un transformateur monophasé comporte un circuit magnétique à deux noyaux, autour desquels sont placés deux bobinages distincts, sans contact électrique entre eux.

Les deux enroulements, primaire et secondaire, sont répartis sur les deux noyaux, de façon telle que le flux qui traverse un enroulement traverse l'autre.

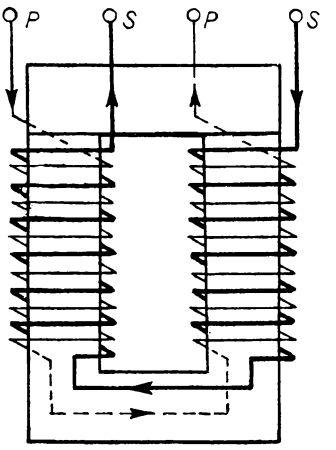


FIG. XVII-17. — Schéma d'enroulement d'un transformateur monophasé. Toutes les bobines sont enroulées dans le même sens pour avoir des flux additifs (P = primaire, S = secondaire).

Les bobines d'un même enroulement doivent être exécutées de façon que le flux qu'elles produisent soit de même sens.

Le courant engendré par induction dans l'enroulement secondaire est de sens contraire de celui du courant d'alimentation dans le primaire.

Dans un transformateur monophasé cuirassé, les deux bobinages sont placés autour du noyau central, qui a une section double de celle d'une colonne extérieure par où revient le flux qui s'est partagé en deux à la sortie du noyau central.

XVII,6. LES TRANSFORMATEURS MONOPHASÉS SPÉCIAUX

6,1. Les transformateurs à prises multiples

Ces transformateurs permettent d'obtenir plusieurs tensions avec un seul bobinage. Il suffit, pour cela, de sortir des prises à différents niveaux de l'enroulement, comme l'indique la *figure XVII*-18.

Les transformateurs classiques sont normalement prévus avec un contacteur de réglage ± 5 %, manœuvrable hors tension, qui permet de compenser les variations de tension du réseau.

Ce contacteur est relié à des spires intermédiaires situées vers la fin du bobinage haute tension.

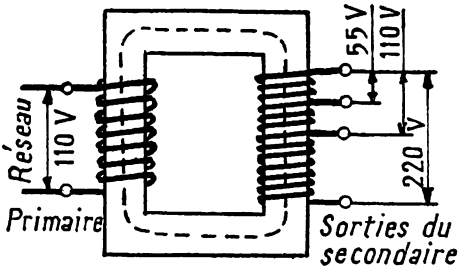


FIG. XVII-18. — Transformateur monophasé à prises multiples.

6,2. Les autotransformateurs

Ces transformateurs ne possèdent qu'un enroulement sur lequel on a sorti des prises branchées :

— au primaire relié au réseau,

— au secondaire branché sur l'utilisation.

L'enroulement peut être à section homogène ou à sections différentes, la plus grosse section étant réservée à la partie utilisée en basse tension.

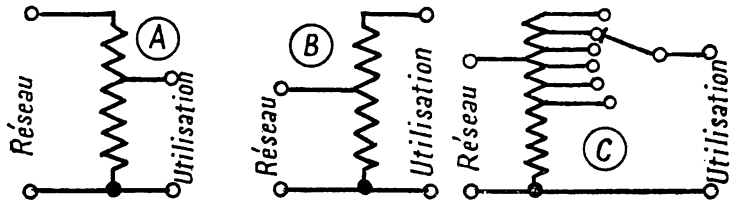


FIG. XVII-19. — (A) autotransformateur abaisseur, (B) élévateur, (C) autotransformateur à prises multiples. Les trois plots du bas sont abaisseurs. Les trois plots supérieurs donnent une tension supérieure à celle du réseau.

Les autotransformateurs peuvent être construits en élévateurs ou en abaisseurs de tension. Ils sont réversibles et peuvent être à prises multiples.

L'autotransformateur peut être avantageux pour des rapports de transformation de l'ordre de 50 % et pour de la basse tension.

Les autotransformateurs sont souvent du type à curseur, ce qui permet d'obtenir un réglage très étendu des tensions.

XVII,7. LES TRANSFORMATEURS TRIPHASÉS

7,1. Constitution

En disposant sur une même carcasse magnétique les bobinages primaires et secondaires de trois transformateurs monophasés, on obtient un transformateur triphasé.

C'est la disposition employée pour les petites et moyennes puissances. Pour les grandes puissances, on utilise de préférence trois transformateurs monophasés que l'on couple.

7,2. Connexions et couplages entre les bobines des phases.

L'association des trois circuits primaires et secondaires permet d'effectuer douze couplages en partant des connexions : étoile, triangle et zigzag.

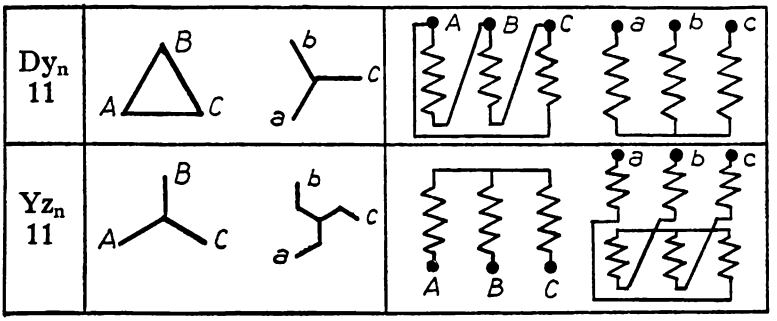


FIG. XVII-20. — Tableau des diagrammes vectoriels des tensions et des schémas des connexions des deux couplages retenus par l'E.D.F. pour le montage des transformateurs. Les bobinages sont tous enroulés dans le même sens.

De ces douze couplages, deux seulement ont été retenus pour les réseaux de distribution. Ce sont les couplages normalisés : triangle-étoile et étoile zigzag.

Le comité électrotechnique international (C.E.T.) a adopté les symboles suivants pour désigner les différents couplages :

H.T. : Etoile *Y*, Triangle *D*.
B.T. : Etoile *y*, Triangle *d*, zigzag *z*.

Couplage des transformateurs.

Chaque transformateur est caractérisé par le couplage de ses enroulements, primaire et secondaire.

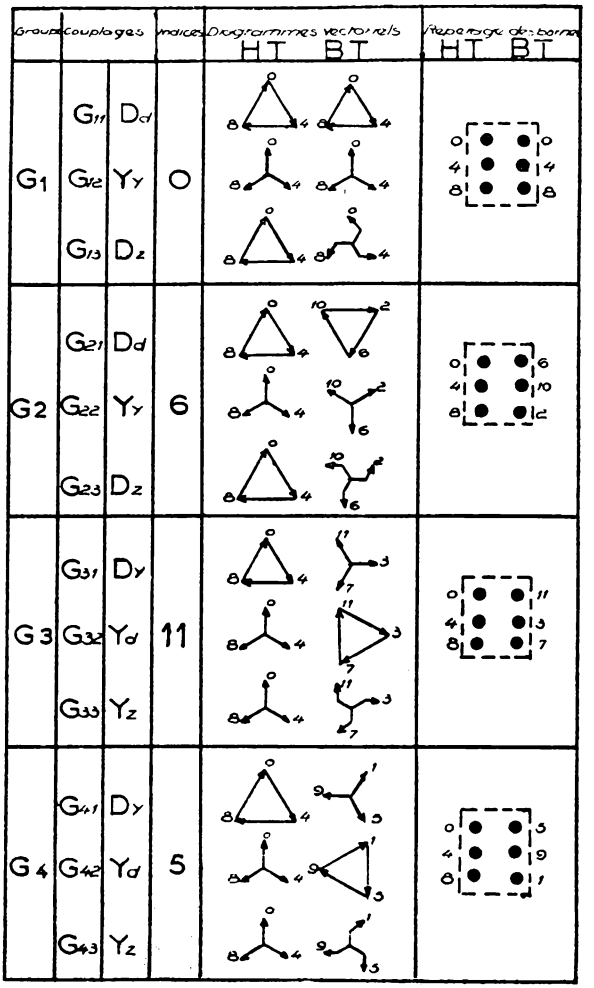


FIG. XVII-21. — Douze couplages possibles pour transformateurs triphasés. Ces 12 couplages sont répartis en quatre groupes, suivant le décalage angulaire entre les bobinages primaire et secondaire, soit G1 = 0°, G2 = 180°, G3 = 30° en avance, et G4 = 150° en retard. A son tour, chaque groupe comprend trois types de couplages.

Douze couplages peuvent être réalisés. Ils ont été répartis en quatre groupes, suivant le décalage angulaire existant entre les bobines primaire et secondaire de chaque transformateur, soit : $G_1 = 0^o$, $G_2 = 180^o$, $G_3 = 30^o$ en avance, $G_4 = 150^o$ en retard, pour des bobinages enroulés dans le même sens.

Chaque groupe comprend trois types de couplages différents, repérés par les indices 1, 2 et 3. En pratique, ce sont deux couplages du groupe G_3 avec les indices 1 et 3 qui sont employés par l'E.D.F., soit : *G* 31-*Dy* et *G* 33-*Yz*, tous deux normalisés par l'U.T.E.

7,3. Les bornes de sortie des transformateurs.

Elles sont constituées par des conducteurs issus des enroulements primaire et secondaire. Ces conducteurs sont isolés du couvercle du transformateur par des porcelaines, dont la taille varie avec la tension appliquée au conducteur.

Les bornes sont réparties en deux lignes sur le couvercle : d'un côté, les bornes H.T. et en face les B.T. (*fig. XVII*-22).

Repérage des bornes.

Les repères utilisés sur les dessins et schémas sont :

— côté haute tension : les lettres *A*, *B*, *C*,

— côté basse tension : les lettres *a*, *b*, c et *n* pour le neutre s'il est sorti.

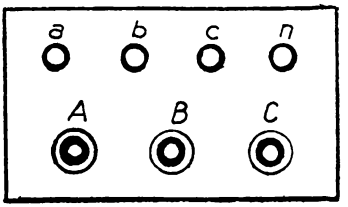


FIG. XVII-22. — Repérage conventionnel des bornes H.T. et B.T. avec neutre sorti, d'un transformateur triphasé dont les bornes H.T. sont représentées par *A*, *B*, *C*.

Bornes homologues.

Deux bornes, primaire et secondaire, sont homologues lorsqu'elles occupent une même position par rapport à leur enroulement sur les noyaux.

La polarité instantanée des bornes homologues dépend du sens de l'enroulement des bobines primaire et secondaire.

Quand elles ont le même sens d'enroulement, les polarités instantanées sont les mêmes, quoique les tensions soient inverses. En effet, pour le primaire il s'agit d'un récepteur et pour le secondaire d'un générateur.

Si l'enroulement secondaire est bobiné en sens inverse de l'enroulement primaire, les bornes homologues n'ont pas la même polarité instantanée (*fig. XVII-1 de droite*).

7,4. Enroulement des bobines

Cet enroulement est exécuté soit sur des bobines rigides en isolant compressé, soit sur un mandrin (généralement en bois) entraîné par un tour.

Le guidage et la tension du fil peuvent se faire à la main, ou au moyen d'un appareil spécial fixé sur le tour.

Le bobinage peut être exécuté soit à gauche, soit à droite.

La *figure XVII-2* montre comment s'effectuent ces

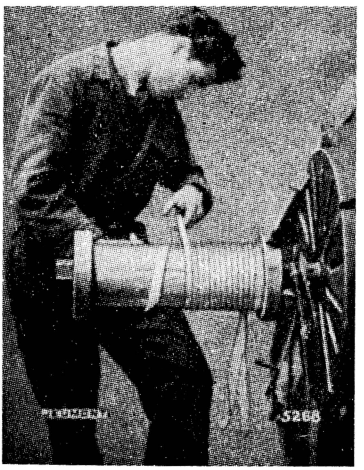


FIG. XVII-23. — Enroulement d'une bobine de transformateur sur un mandrin entraîné par un tour. Le fil a un profil rectangulaire. L'enroulement est dit « à droite »; il progresse dans le sens d'un écrou sur un filet normal à droite. Document Jeumont.

enroulements. Le tour tourne dans le sens des aiguilles d'une montre lorsqu'on fait face à son plateau (2). Dans la *figure D*, le fil (4) sortant du dévidoir, sera engagé sur la partie supérieure du mandrin côté plateau, en (3), pour obtenir un enroulement dit « à droite ». Les spires s'enroulent alors comme les filets d'une vis normale, à droite.

Pour avoir un enroulement « à gauche », on débute en (5) à l'extrémité du mandrin. Les spires s'enroulent alors comme un pas de filet de vis à gauche.

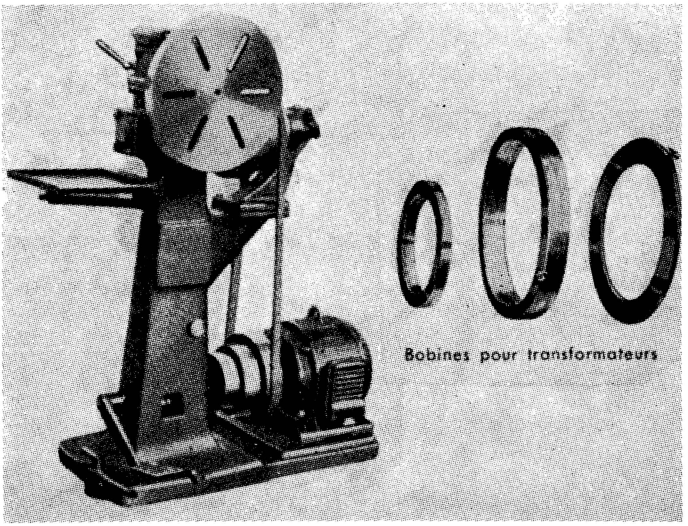


FIG. XVII-24. — Tour à bobiner de moyenne puissance. On remarque, au pied du tour, la pédale de mise en marche et, à droite, trois galettes en fil rond. Document Micafil.

Il est évident que, pour commencer la bobine, il faut fixer l'origine de la première spire contre la joue du mandrin et relier entre elles les premières spires avec un ruban, afin de les maintenir en place. Ceci est réalisable avec un fil rond ou rectangulaire d'une certaine section. Mais avec du fil fin (de l'ordre de 1 ou même 2 mm²), l'enroulement

se fait directement sur une bobine en carton compressé, rigide, qui sera disposée autour du noyau magnétique. On intercale également, entre chaque couche, un papier ou une toile isolante.

7,5. Les prises de réglage

Dans l'installation d'un transformateur, il arrive que l'on soit amené à abaisser ou à élever légèrement la tension au départ. Pour cela, il est prévu des prises de réglage dont le but est :

— de maintenir la tension secondaire constante en alimentant le primaire sous des tensions différentes,

— d'utiliser au secondaire différentes tensions.

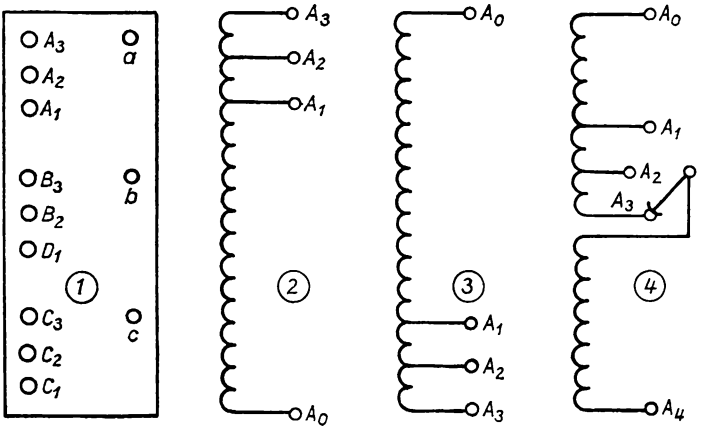


FIG. XVII-25. — (1) positionnement des bornes sur le couvercle d'un transformateur triphasé avec prises de réglage. (2) prises placées en haut de la colonne. (3) prises placées en bas. (4) prises placées au centre de la colonne et son commutateur.

Disposition des prises de réglage.

Les prises de réglage peuvent être disposées à l'une des extrémités du bobinage des phases, ou vers le milieu des colonnes, en particulier dans le cas de bobines alter-

nées, ce qui donne la possibilité d'adjoindre ou de supprimer des bobines par l'intermédiaire d'un commutateur.

Les prises de réglage peuvent être comparées à ce qui existe sur la *figure XVII*-19. *C*, en ce qui concerne un autotransformateur à prises multiples, à la différence que le dispositif agit ici sur les trois phases.

L'ajustement de la tension peut également s'obtenir par un dispositif de couplage des prises de réglage.

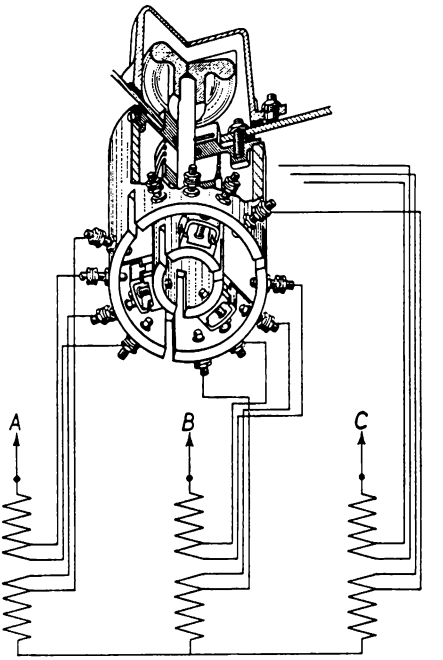


FIG. XVII-26. — Commutateur de prises ± 5 % représenté schématiquement. Les prises sont faites au milieu des trois colonnes réunies en étoile par le bas. Le départ aux bornes est en haut des colonnes.

Les moyens de réglage.

Le réglage se fait à l'aide d'un commutateur pouvant être commandé manuellement, ou électromécaniquement à distance.

Les prises de réglage permettent d'obtenir des variations de tensions de l'ordre de 2,5 % de la tension nominale.

7,4. Diagramme vectoriel d'un transformateur

Le tracé des vecteurs doit être considéré suivant la position réelle de chacune des bobines, toutes les bobines étant enroulées « à droite », avec l'entrée en haut (par exemple).

La position des vecteurs dépend du mode de couplage des bobines haute tension (*A*, *B*, *C*) d'une part, et basse tension (*a*, *b*, *c*) d'autre part, qui peuvent être montées : soit en triangle, soit en étoile, soit en zigzag.

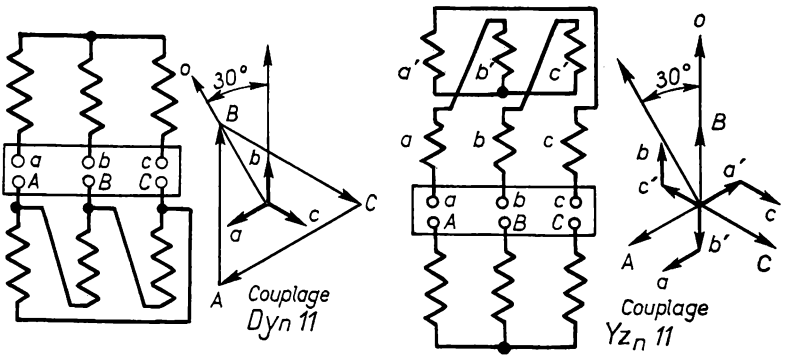


FIG. XVII-27. — Diagrammes vectoriels des deux couplages normalisés Dy_n 11 et Yz_n 11. Avec *Dy*, le calage de *b* sur *B* est de 30° en retard. Avec *Yz*, le décalage de *b* sur *B* est de 30° en avant.

A droite, dans la *fig. XVII-27* on a : côté H.T. un couplage étoile avec un enroulement des bobines supposé « à droite ». Le vecteur *B* sera alors dessiné vers le haut, verticalement et à l'instant considéré pour *B* le vecteur *A* sera en avance sur *B* de 120° (suivant le sens trigonométrique) et le vecteur *C* sera en retard de 120° sur *B*. Dans le diagramme *Yz*, la H.T. est en avance de 30° sur la B.T. Avec le diagramme *Dy*, la H.T. est en retard de 30° sur la B.T.

Dans la *figure XVII-28*, les bobines sont enroulées « à gauche ». Dans ce cas, le vecteur B est dirigé vers le bas et le vecteur A est en avance de 120° sur B, tandis que le vecteur C est en retard de 120° sur B.

Sur ce dessin, on ne représente que les trois phases côté H.T., avec leurs évolutions sinusoïdales.

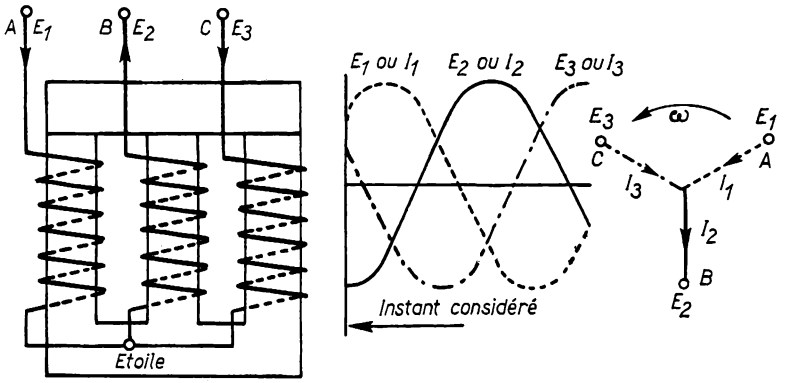


FIG. XVII-28. — Enroulement dit « à gauche » du primaire d'un transformateur triphasé couplé en étoile. A l'instant considéré sur les sinusoïdes, les intensités dans E_1 et E_3 sont positives et égales à $\frac{I \text{ maximale}}{2}$.

L'intensité dans E_2 est négative et égale à I maximale.

Pour tracer le diagramme vectoriel, on prend pour origine des vecteurs le départ de l'enroulement correspondant, soit, ici, le point neutre pour les trois vecteurs.

7,5. Marche en parallèle des transformateurs

Pour faire fonctionner en parallèle deux transformateurs, plusieurs conditions sont nécessaires. Ils doivent avoir, en particulier :

— le même rapport de transformation à vide, c'est-à-dire les mêmes tensions nominales au primaire et au secondaire;

— les mêmes sens de rotation des phases;

— les mêmes décalages angulaires;

— les mêmes chutes de tensions internes en marche;

— un rapport de puissance qui ne dépasse pas 2 (autant que possible), soit, par exemple 65/130 kVA.

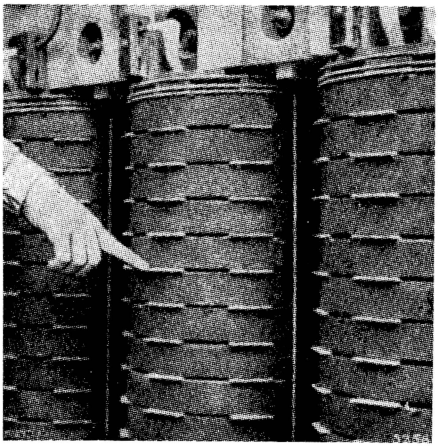


FIG. XVII-29. — Enroulements terminés d'un gros transformateur « Jeumont ». On remarque, entre les galettes, les tasseaux isolants qui facilitent la circulation de l'huile de refroidissement.

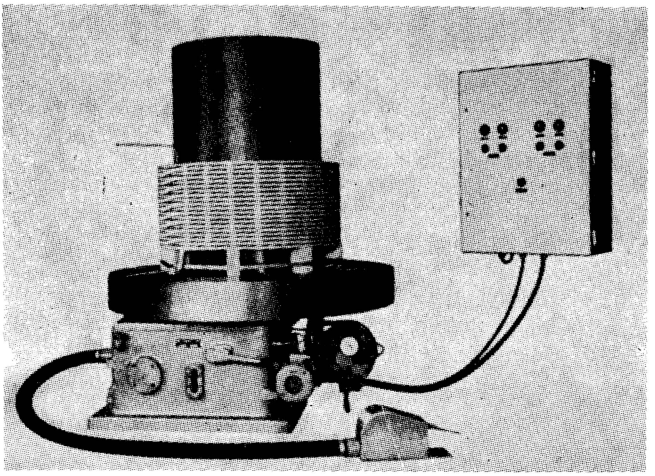


FIG. XVII-30. — Grosse bobine concentrique en cours d'enroulement sur un tour vertical de la S.A. Micafil.

La mise en parallèle s'effectue dans de bonnes conditions lorsque l'échange de courant entre les transformateurs est pratiquement nul sous tous les régimes de fonctionnement.

Mise en parallèle sur un réseau.

On relie, aux mêmes fils de la ligne, les bornes homologues H.T. et B.T. de chacun des transformateurs. Mais, avant de faire ces branchements, il est conseillé d'effectuer des mesures comme il est indiqué dans le chapitre III-5 du tome II.

7,6. Caractéristiques des transformateurs pour réseau de distribution.

Leur choix porte en particulier sur :

— le nombre de phases (généralement trois);

— la fréquence (25, 42 ou 50 hertz) généralement 50 Hz;

— la puissance. La puissance nominale U.T.E. = tension secondaire à vide $\times$ courant secondaire de pleine charge $\times \sqrt{3}$.

L'appareil devra débiter sa puissance si l'on remonte la tension primaire de telle sorte que la tension en charge soit égale à la tension à vide (sur la prise normale).

La gamme des puissances normalisées des transformateurs est établie en fonction de leur utilisation et de la tension d'alimentation.

Tensions nominales du primaire (kV)	Puissances nominales (kVA)	
	Transformateurs en cabine	Transformateurs sur poteaux
5,5 - 10 - 15 - 20	25 - 50 - 100 - 160 250 - 400 - 630	25 - 50 - 100
30	25 - 40 - 63 - 100 - 160 250 - 400 - 630	25 - 40 - 63

— la tension nominale moyenne tension (voir le tableau);

— les tensions nominales basse tension. Les tensions du secondaire seront de 400 V et 231 V. Si le transformateur n'a qu'une tension secondaire, celle-ci devra être de 400 volts (NF C 52-112 avec entrée en vigueur le 1er janvier 1969);

— les couplages normalisés (voir *fig. XVII-20*). Dy_n 11 (triangle-étoile avec neutre sorti) et Yz_n 11 (étoile-zigzag avec neutre sorti sur l'étoile zigzag).

XVII,8. CALCUL ÉLÉMENTAIRE D'UN TRANSFORMATEUR TRIPHASÉ

Caractéristiques du transformateur.

Il s'agit d'un transformateur triphasé 3 kVA, 220/110 V, 50 Hz :

— Montage : Etoile;

— Puissance utile fournie : $Pu = 3\,000$ VA;

— Fréquence : 50 hertz;

— Rendement : $\eta = 95$ %.

8,1. Calcul de la section d'un noyau

$$Sn \text{ (fer + isolant)} = C\sqrt{\frac{\text{VA}}{3f}}\ \text{cm}^2$$

C = constante (de Richter) variant de 4 à 6,

f = fréquence.

Cette équation se ramène à :

$$Sn \text{ (fer + isolant)} = \frac{\text{C}}{3f}\sqrt{\text{VA}} =$$

$$\frac{\text{C}}{\sqrt{150}}\sqrt{\text{VA}} = \frac{\text{C}}{12{,}2}\sqrt{\text{VA}}.$$

Faisant $C = 5{,}4$.

$$Sn \text{ (fer + isolant)} = \frac{5{,}4}{12{,}2}\sqrt{3\,000} =$$

$$0{,}44\sqrt{3\,000} = 0{,}44 \times 55 = 24{,}4 \text{ m}^2.$$

On adoptera 25 cm et la forme carrée.

Chacun des trois noyaux aura 25 cm² de section (fer + isolant).

Section nette d'un noyau :

$Sn = 0{,}9 \times 25 = 22{,}5$ cm² (fer seul), avec coefficient de remplissage $Kf = 0{,}9$.

8,2. Calcul du nombre de spires par phase pour la tension primaire.

$U_1 = 220$ volts avec une induction dans le fer,

$B = 10\,000$ gauss $= 1$ tesla.

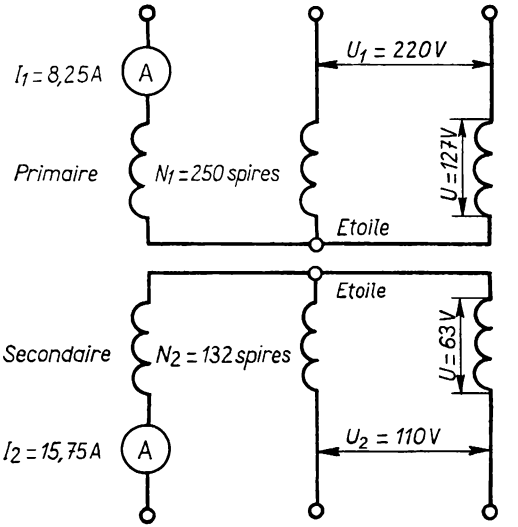


FIG. XVII-31. — Caractéristiques des bobinages du transformateur étudié au chapitre XVII-8.

$$N_1 = \frac{U_1}{\sqrt{3}\ 4{,}44\ f\ \mathcal{B}\ S} =$$

$$= \frac{220}{1{,}73 \times 4{,}44 \times 50 \times 1 \times 0{,}00225\ m^2} = 250 \text{ spires.}$$

Volts par spire : $\dfrac{220}{\sqrt{3} \times 250} = 0{,}51$ V au primaire.

8,3. Calcul des courants dans les enroulements

En admettant un rendement de 95 %, on a :

Dans le primaire :

$$I_1 = \frac{VA_2}{\eta\ U_1 \sqrt{3}} = \frac{3\,000}{0{,}95 \times 220 \times 1{,}73} = 8{,}25 \text{ A.}$$

Dans le secondaire :

$$I_2 = \frac{VA_2}{U_2 \sqrt{3}} = \frac{3\,000}{110 \times 1{,}73} = 15{,}75 \text{ A.}$$

8,4. Recherche du nombre de spires à placer dans le circuit secondaire

On admet une chute de tension de 5,4 %, uniquement dans l'enroulement secondaire, soit : $5{,}4 \times 110 = 5{,}94$ (6 volts).

La tension à vide du secondaire devra être de :

$$110 \text{ V} + 6 = 116 \text{ volts.}$$

Ce qui donne un rapport de transformation à vide α de :

$$\alpha = \frac{U_1 \text{ réseau}}{U_2 \text{ à vide}} = \frac{220}{116} = 1{,}896 \text{ soit } 1{,}90.$$

On a également $\alpha = \dfrac{N_1}{N_2}$.

N_1 = spires primaires par phase,
N_2 = spires secondaires par phase.
N_1 = 250 spires (calculé au paragraphe 8,2.).

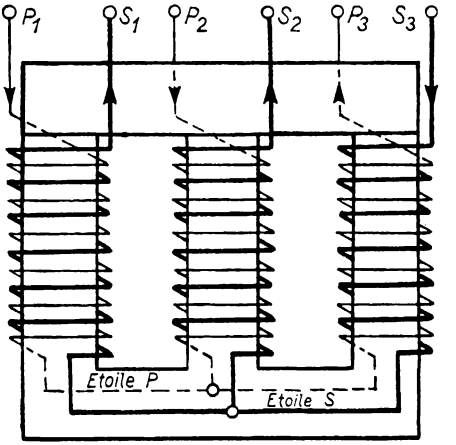


FIG. XVII-32. — Enroulements étoile-étoile d'un transformateur triphasé. Toutes les bobines primaires et secondaires sont enroulées dans le même sens, d'où l'opposition des flèches indiquant le sens des tensions sur chaque colonne.

Le nombre de spires secondaires sera :

$$N_2 = \frac{N_1}{\infty} = \frac{250}{1{,}90} = 131{,}57, \text{ soit } 132 \text{ spires.}$$

Ou encore : $\frac{N_1}{N_2} = \frac{U_2}{U_1}$, d'où :

$$N_2 = \frac{N_1 U_2}{N_1} = \frac{250 \times 116}{220} = 131{,}81, \text{ soit } 132 \text{ spires.}$$

8,5. Calcul des courants dans les enroulements

Dans le primaire I_1, on a :

$$I_1 = \frac{VA_2}{\eta U_1 \sqrt{3}} = \frac{3\,000}{0{,}95 \times 220 \times 1{,}73} = 8{,}25 \text{ A.}$$

Dans le secondaire I_2 :

$$I_2 = \frac{VA_2}{U_2\sqrt{3}} = \frac{3\,000}{110 \times 1{,}73} = 15{,}75 \text{ A.}$$

Ces courants ne sont valables que si la puissance utile de 3 000 VA fournie par le transformateur se maintient constante.

8,6. Calcul de la section et du diamètre du fil des enroulements

1° Pour le circuit primaire.

En admettant une densité de courant de 2,2 A par millimètre carré pour le fil de cuivre utilisé, on a une intensité maximale I_1 de 8,25 A et une section de 8,25 : 2,2 = 3,75 mm², soit un fil de cuivre nu de 2,2 mm de diamètre.

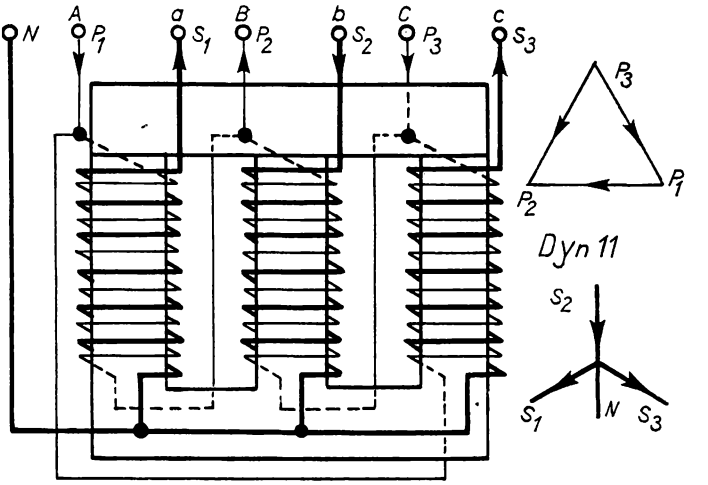


FIG. XVII-33. — Schéma de bobinage couplé en triangle-étoile, à neutre sorti sur l'étoile (couplage normalisé). Toutes les bobines sont enroulées à droite et les tensions en opposition dans les colonnes.

Le fil isolé avec deux couches de coton aura un diamètre de 2,47 mm et 2,36 mm avec une seule couche.

2° *Pour le circuit secondaire.*

L'intensité I_2 maximale étant de 15,75 A, la section du fil nu devra avoir 15,75 : 2,2 = 7,16 mm² et son diamètre 3 mm.

Avec un isolement de deux couches de coton, on a un diamètre de 3,31 mm, et avec une seule couche 3,20 mm.

8,7. Constitution et dimensions des enroulements

Etant donné les indications obtenues jusqu'ici, on connaît :

Pour le circuit primaire :

— tension : 220 V;

— nombre de spires par phase : 250 spires;

— si l'on admet trois couches de spires, on a 250 : 3 = 83,33 spires par couche, soit une couche de 84 spires et deux couches de 83;

— longueur de la bobine : 2,47 × 84 = 207,48 soit 210 mm.

Pour le circuit secondaire :

— tension : 116 V à vide et 110 V en charge;

— nombre de spires par phase : 132 spires;

— diamètre du fil isolé deux couches coton : 3,31 mm;

— si l'on répartit les 132 spires en deux couches, on a 132 : 2 = 66 spires par couche. Ces spires occuperaient une longueur de : 66 × 3,31 = 218,46 soit 220 mm.

Conclusion.

— Le circuit secondaire ayant la plus grande longueur pour son bobinage, on enroulera toutes les bobines sur 220 mm de long.

— Le circuit secondaire nécessitera deux couches de 66 spires.

— Le circuit primaire, qui comprend 250 spires d'un fil isolé de 2,47 mm de diamètre, logera sur une couche 220 : 2,47 = 89 spires.

— Deux couches nécessiteront 89 × 2 = 178 spires.

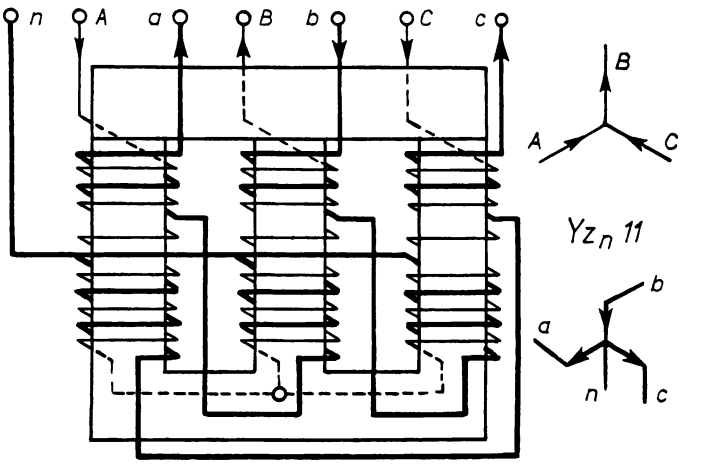


FIG. XVII-34. — Schéma d'enroulement triphasé couplé en étoile-zigzag avec neutre sorti sur l'étoile du zigzag. Chaque colonne reçoit un demi-bobinage zigzag de deux phases différentes, enroulé en sens inverse l'un par rapport à l'autre. Lors de l'enroulement, les deux demi-bobines d'une colonne sont enroulées ensemble (en parallèle), avec un isolement entre elles, en rapport avec les tensions en présence. Pour une même tension en ligne, ce couplage nécessite 1,16 fois plus de spires que le couplage étoile, car les tensions ne sont pas en phase dans les deux demi-bobines. La tension résultante est seulement $\frac{U_2\sqrt{3}}{2}$ volts, au lieu de U_2 dans le couplage étoile.

— La troisième couche comprendra 250 — 178 = 72 spires.

— Le vide laissé par une longueur de 17 spires sera comblé par une bande de presspahn, enroulée sur la deuxième couche.

8,8. Hauteur des noyaux magnétiques

Connaissant la longueur des bobines, il est possible de déterminer la hauteur des noyaux qui, dans la pratique, varie de 3 à 5 fois de la largeur d'un noyau.

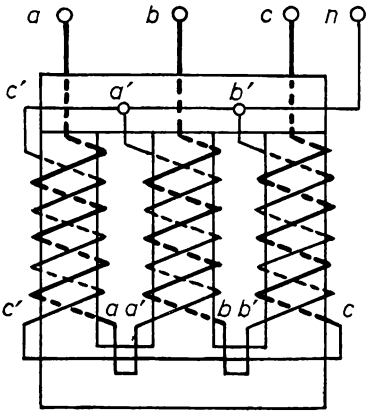


FIG. XVII-35. — Enroulement zigzag du circuit secondaire (B.T.) d'un transformateur étoile-zigzag. Les deux demi-bobines de chaque colonne sont enroulées ensemble (en parallèle). Toutes les bobines des colonnes sont enroulées dans le même sens et leurs extrémités reliées comme l'indique le dessin.

Les bobines ayant 210 mm de long, il faut encore tenir compte d'un certain jeu global et de l'isolement à la masse, soit :

jeu supérieur	4	18 mm
joues des bobines	6	
jeu inférieur	4	
foisonnement	4	

Ce qui donne une hauteur des noyaux égale à :

$$220 + 18 = 238 \text{ mm.}$$

8,9. Dimensions des fenêtres du circuit magnétique

L'encombrement pris par une demi-bobine comprend, dans l'ordre, en partant du noyau vers l'extérieur de la bobine :

Un intervalle entre le noyau et le cylindre de la bobine	14,00 mm
L'épaisseur de l'isolant du cylindre (support du secondaire)	3,00
Deux couches de fil de 3,31 mm de diamètre	6,60
L'épaisseur de l'isolant du cylindre (support du primaire)	3,00
Trois couches de fil de 2,47 mm de diamètre	7,40
Le dépassement des joues isolantes	5,00
Le ½ jeu entre deux joues de bobines	3,00
D'où un encombrement global de :	42,00 mm

Ce qui conduit à une fenêtre de $42 \times 2 = 84$ mm de largeur.

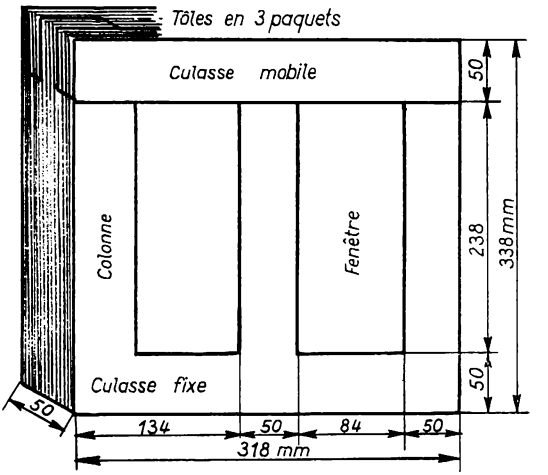


FIG. XVII-36. — Caractéristiques du circuit magnétique du transformateur calculé au chapitre XVII-8, sous-titre 8,10.

8,10. Dimensions du circuit magnétique

Dimensions des noyaux : 50 mm au carré.
Dimension des culasses, fixe et mobile : 50 mm au carré.
Hauteur des noyaux : 238 mm.
Hauteur du circuit magnétique : $238+50+50 = 338$ mm.
Dimension des fenêtres : 238/84 mm.
Largeur du circuit magnétique : $(3\times50) + (2\times84) = 318$ mm.

8,11. Montage du transformateur triphasé de 3 kVA.

Les parties essentielles du transformateur étant calculées, il suffit, pour monter cet appareil, de se reporter à la *figure XVIII-5*. Celle-ci donne, par le dessin, les détails des pièces accessoires.

Les transformateurs des *figures XVII-36* et *XVIII-5* ayant des caractéristiques très rapprochées, faciliteront le montage de celui qui vient d'être étudié ci-dessus.

Transformateur monophasé, formes I et II.

Transformateur triphasé (formes I et II; exemple : étoile-triangle).

Transformateur monophasé; exemple : 60 000-16 000 (*ou* 16 000-60 000), V, 2 000 kVA, 50 Hz.

Transformateur biphasé; exemple : 40 Hz, *trois fils-quatre fils*, 5 kV 500 V, 100 kVA.

Tranformateur triphasé; exemple : 50 Hz, 6 000-220-380 V, 500 kVA, étoile-zigzag, neutre sorti.

Autotransformateur, symbole général et triphasé étoile dans les formes I et II.

Transformateur triphasé, avec par exemple : 4 prises côté étoile.

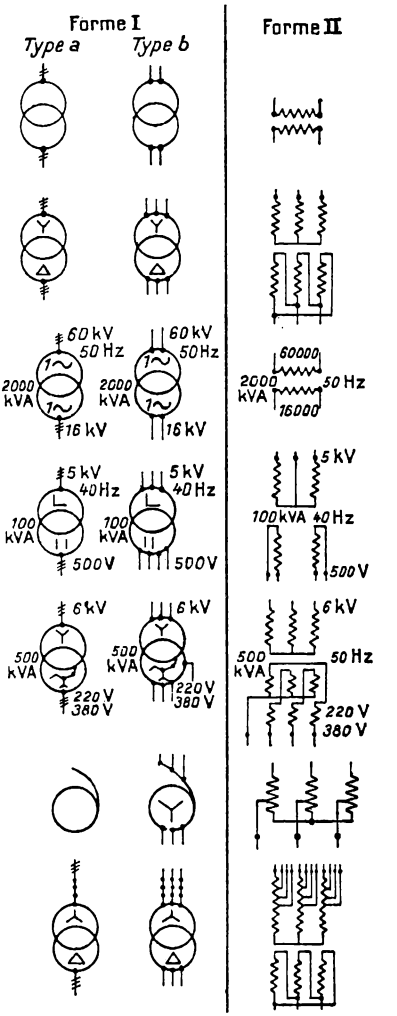


FIG. XVII-38. — Symboles pour transformateurs.

CHAPITRE XVIII

CONSTRUCTION DE TRANSFORMATEURS DE PETITES PUISSANCES

XVIII,1. RÉALISATION D'UN TRANSFORMATEUR MONOPHASÉ DE 100 W

1,1. Caractéristiques générales (*fig. XVIII-1*).

Puissance utile en service continu : 100 W.
Tensions : 110/20 V, 50 Hz.
Intensités : 0,92/5 A.
Pertes à vide : 4,5 W.
Rendement : 87 %.

Ce transformateur et les trois autres qui vont suivre, ont été calculés et réalisés par la Section d'électricité d'un Collège technique (actuellement Lycée technique), comme exercices d'appareillage et de bobinage, cela en vue de la préparation au B.E.I. (Brevet d'enseignement industriel).

1,2. Constitution générale.

Un circuit magnétique.
Un enroulement primaire concentrique.
Un enroulement secondaire concentrique.
Une plaque à bornes.

Le circuit magnétique.

Il est constitué par des tôles d'acier au silicium de 0,4 mm d'épaisseur, isolées au vernis et empilées entre deux joues

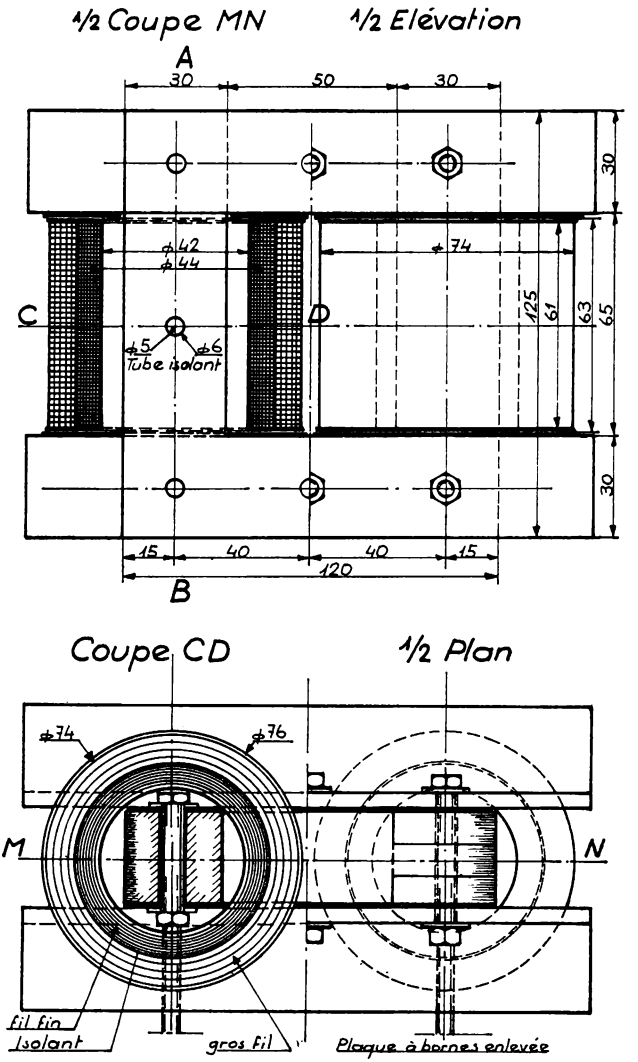
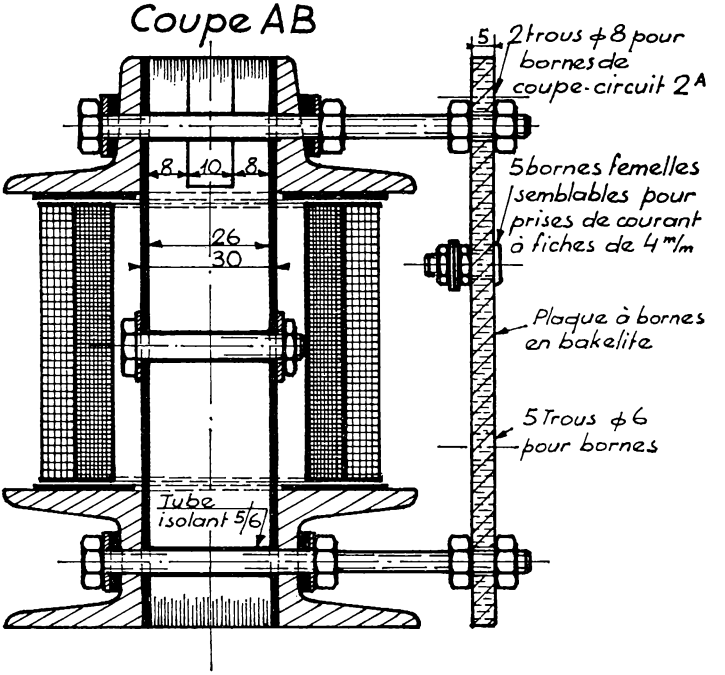


FIG. XVIII-1. — Petit transformateur monophasé de 100 W, 110/20 V, 50 Hz, décrit dans le chapitre XVIII,1.

La liaison entre les enroulements et les bornes du tableau est donnée par le dessin contenu dans le tableau en bakélite. Les bornes sont constituées par des alvéoles permettant de brancher une fiche bipolaire avec broches de 4 mm de diamètre (10 A).



Plaques à bornes

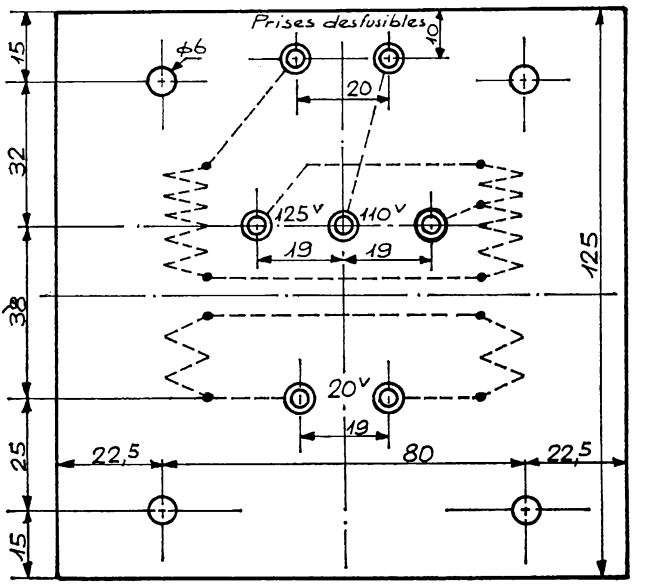


Schéma des enroulements

en bakélite de 2 mm. Le serrage des tôles est effectué au moyen de quatre boutons de 5 × 40 mm et quatre tiges filetées de 5 × 100 mm.

Ces boulons et tiges sont isolés du fer par un tube en papier bakélisé de 5/6 × 30 mm de long.

Deux fers cornières de 30 × 166 mm de longueur et deux fers en U de 30 × 166 mm de long complètent le circuit magnétique.

Le détail de la plaque à bornes et le schéma des entrées et sorties des bobines figurent sur le dessin.

1,3. Les enroulements, leur constitution.

Ils comportent :

1. Deux cylindres en bakélite, d'un diamètre de 42 mm intérieur, 44 mm extérieur et 61 mm de long chacun, pourvus de deux joues de 76 mm de diamètre.

2. Un enroulement primaire, constitué, pour chaque bobine, de sept couches de 57 spires chacune. Le fil est en cuivre de 0,8 mm de diamètre, isolé à l'émail.

Le bobinage primaire comporte 798 spires de 128 mètres de longueur.

Le transformateur étant étudié pour fonctionner soit sur 110 V, soit sur 125 V, deux sorties sont prévues sur l'une des bobines.

La sortie 110 V sera effectuée sur la 700e spire.

3. Un enroulement secondaire, bobiné sur le primaire, après avoir, au préalable, placé une bande de presspahn de 1 mm d'épaisseur.

Cet enroulement comporte pour chaque bobine : trois couches de 25 spires de fil de 1,8 mm nu et 2.07 isolé par deux couches de coton.

Pour les deux bobines, on a : 32 m de fil et 150 spires.

XVIII,2 MONTAGE D'UN TRANSFORMATEUR MONOPHASÉ DE 3 kVA

2,1. Caractéristiques générales (*fig. XVIII-2*).

Fréquence de fonctionnement : 50 hertz.

Puissance en service continu : 3 kVA.

Tension applicable entre les bornes primaires *a* et *b*, ou *c* et *d* : 110 V.

Tension applicable entre les bornes *a* et *d* : 220 V, en reliant les bornes *b* et *c*.

Tensions secondaires : 30 V entre les bornes 0 et 1, 60 V entre les bornes 0 et 2, 90 V entre les bornes 0 et 3 et 120 V entre les bornes 0 et 4.

Ces tensions s'abaisseraient sensiblement de moitié, en n'utilisant, au primaire, qu'une bobine sur un réseau 110 V.

Intensité prise au primaire : 14 ampères.

Intensité disponible au secondaire : 24 ampères.

Refroidissement : dans l'air.

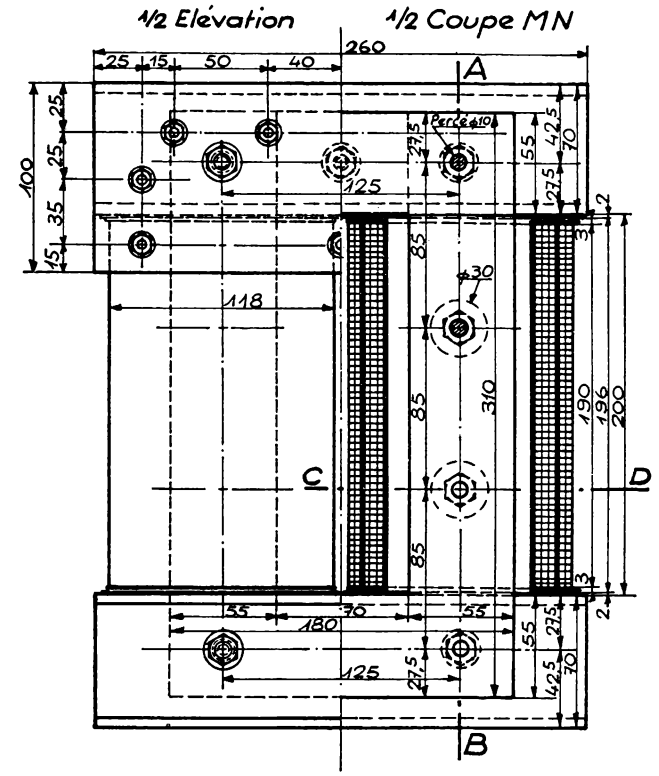
2,2. Constitution du tranformateur

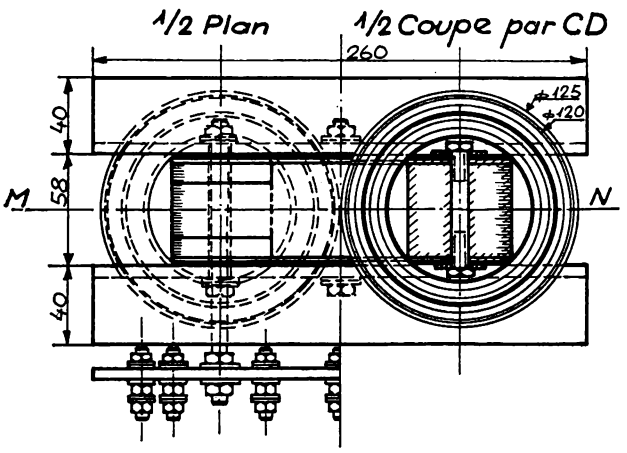
Le circuit magnétique.

Il comporte 16 kg de tôle d'acier au silicium de 0,4 mm d'épaisseur, isolées au vernis.

Ces tôles, qui composent le circuit magnétique, sont serrées entre deux plaques d'acier doux de 1,5 mm d'épaisseur, recouvertes elles-mêmes de deux plaques en bakélite de 2,5 mm.

Le tout est assemblé et serré par boulons de 8 mm de diamètre séparés du circuit magnétique par un tube isolant de 8/10 × 58 mm de long. Deux tiges filetées de 8 × 150 mm pourvues d'un isolant sur la partie en contact avec le fer complètent le serrage. Ces tiges servent également de support à la plaque à bornes, qui comporte neuf bornes en laiton de 6 × 45 mm.


1/2 Elévation
1/2 Coupe MN
260
25
15
50
40
A
Percé ϕ10
27,5
55
42,5
70
27,5
125
100
25
25
35
15
2
3
85
ϕ30
118
85
310
190
196
200
C
D
85
3
2
55
70
55
180
55
27,5
125
27,5
42,5
70
B


1/2 Plan
1/2 Coupe par CD
260
ϕ125
ϕ120
40
58
40
M
N

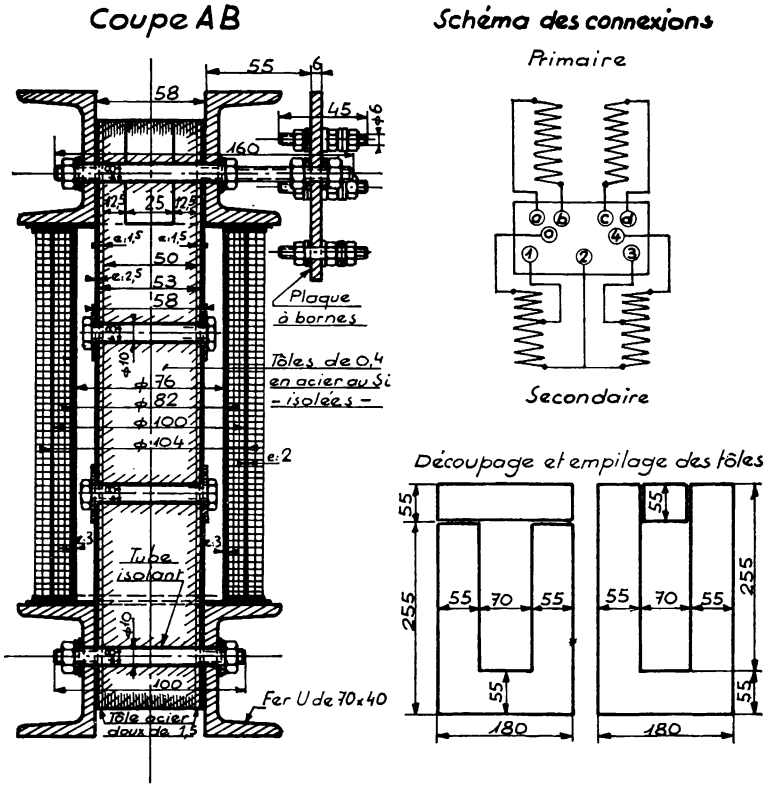


FIG. XVIII-2. — Vues d'un transformateur monophasé de 3 kVA, 110 ou 220 V au primaire et à sorties multiples au secondaire : 30 V, 60 V, 90 V et 120 volts, avec branchement sur le réseau 220 V, 50 hertz.

Quatre fers en forme de U, de 70 × 40 mm, placés sur les culasses, permettent de serrer fortement l'ensemble.

La culasse supérieure mobile a ses tôles enchevêtrées en trois paquets, avec les tôles des deux colonnes, comme l'indique le dessin.

Cela implique deux dimensions de tôles : pour la culasse mobile d'une part, et pour les tôles en U des colonnes d'autre part.

2,3. Bobinage du transformateur

Il s'effectue sur deux bobines isolantes ou sur deux tubes de presspahn de 3 mm d'épaisseur, avec des joues rapportées. Les deux bobinages, primaire et secondaire, se placent l'un sur l'autre (enroulement concentrique), mais sont séparés par un fort isolant.

Les enroulements, primaire et secondaire, placés sur les deux noyaux, doivent être bobinés dans le même sens, la sortie d'une colonne étant raccordée à l'entrée de l'autre, afin que les flux s'ajoutent.

Enroulement primaire.

Il est constitué par trois couches de 66 spires chacune, soit : 198 spires par bobine et 396 spires pour les deux bobines. Le tout est d'un poids de 4,5 kg pour 113 m de fil.

Le fil de cuivre utilisé a une section de 4,52 mm², un diamètre de 2,4 mm nu et 2,8 mm avec un isolement de deux couches de coton. Un papier ou une toile isolante sera placé entre chaque couche.

Enroulement secondaire.

Il sera séparé du primaire par une bande de presspahn de 2 mm d'épaisseur.

L'enroulement secondaire comporte deux couches de 54 spires par bobine et 108 spires en tout, d'une longueur de fil de 78 mètres pesant 5 kg.

Le fil de cuivre a une section de 7,06 mm², un diamètre de 3 mm nu, et 3,4 mm isolé par deux couches de coton.

Les deux couches de spires seront séparées par une toile isolante ou du papier.

Des sorties pour tensions intermédiaires seront pratiquées au milieu de chaque bobine à l'entrée de la deuxième couche, soit toutes les 54 spires. Ces sorties, dont l'isolement sera renforcé, permettront d'avoir, au secondaire, les tensions suivantes : 30 V - 60 V - 90 V et 120 volts.

Il faudra veiller à faire des sorties suffisamment longues pour atteindre les boulons de la plaque à bornes.

Les deux bobines sont elles-mêmes isolées du circuit magnétique, en haut et en bas, par deux rondelles en bakélite de 2 mm d'épaisseur percées aux dimensions de la section des colonnes.

Les bobines terminées seront vernies avec un produit isolant : gommelaque, bakélite, etc.

2,4. La plaque à bornes

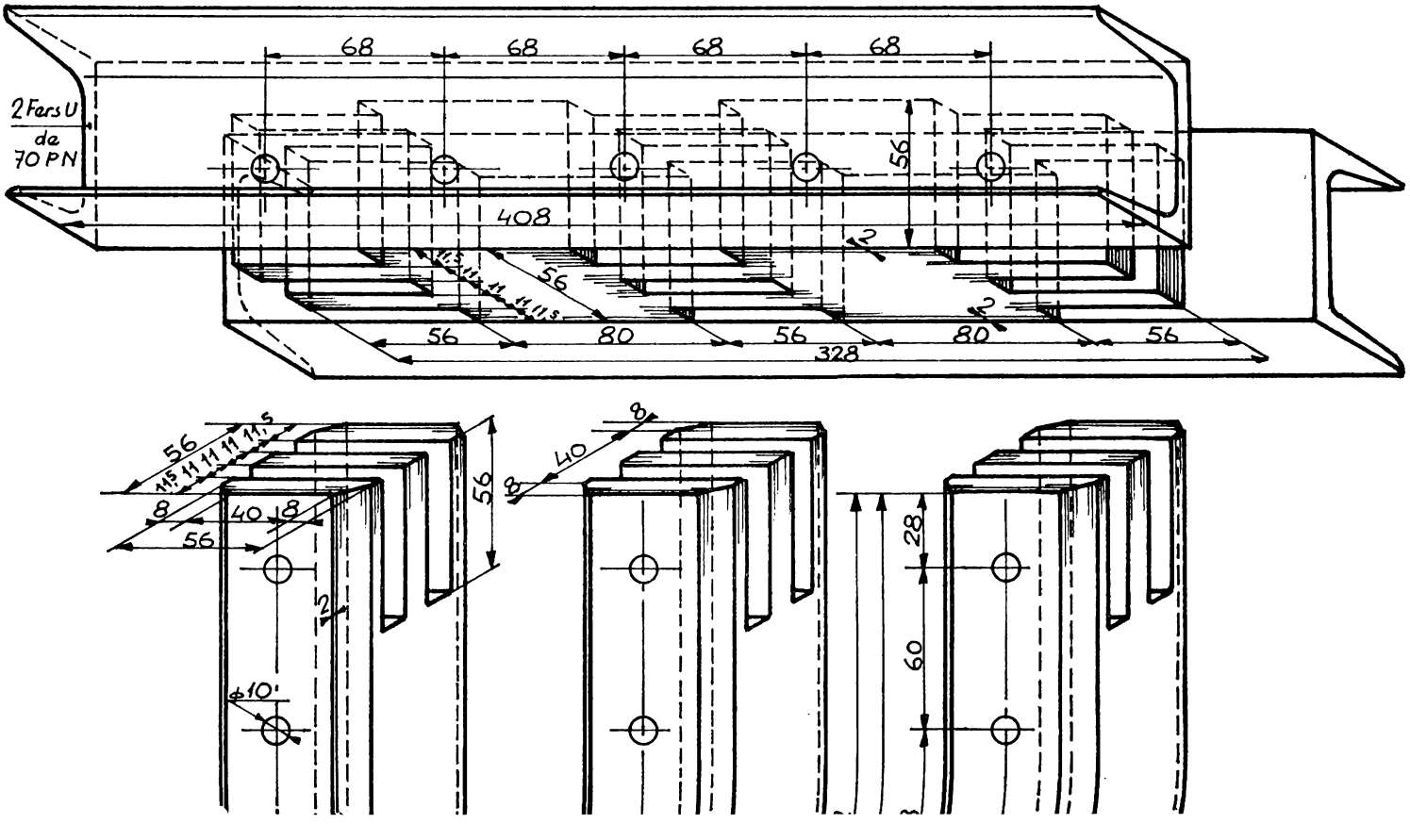
Elle est constituée par une plaque isolante en bakélite de 6 mm d'épaisseur × 100 × 260 mm. La plaque est supportée par deux tiges filetées en acier doux de 8 mm de diamètre et 150 mm de longueur. Ces tiges sont isolées dans la traversée du fer.

La disposition des bornes est donnée par le schéma des connexions et leurs emplacements cotés par la *figure XVIII-2*.

XVIII,3. CONSTRUCTION D'UN TRANSFORMATEUR TRIPHASÉ DE 200 W

3,1. Caractéristiques générales (*fig. XVIII-3*).

Puissance utile, 200 W environ.
Tension primaire : 220 V en montage étoile.
Tension secondaire : 30 V en montage triangle.
Intensité disponible au secondaire : 2,5 A.
Intensité prise par le primaire : 0,505 A.
Fréquence : 50 hertz.



2 Fers U
de
70 PN
68
68
68
68
56
408
2
11,5
11
11
11
11,5
56
2
56
80
56
80
56
328
56
11,5
11
11
11
11,5
8
40
8
56
56
2
ϕ10'
8
40
8
28
60

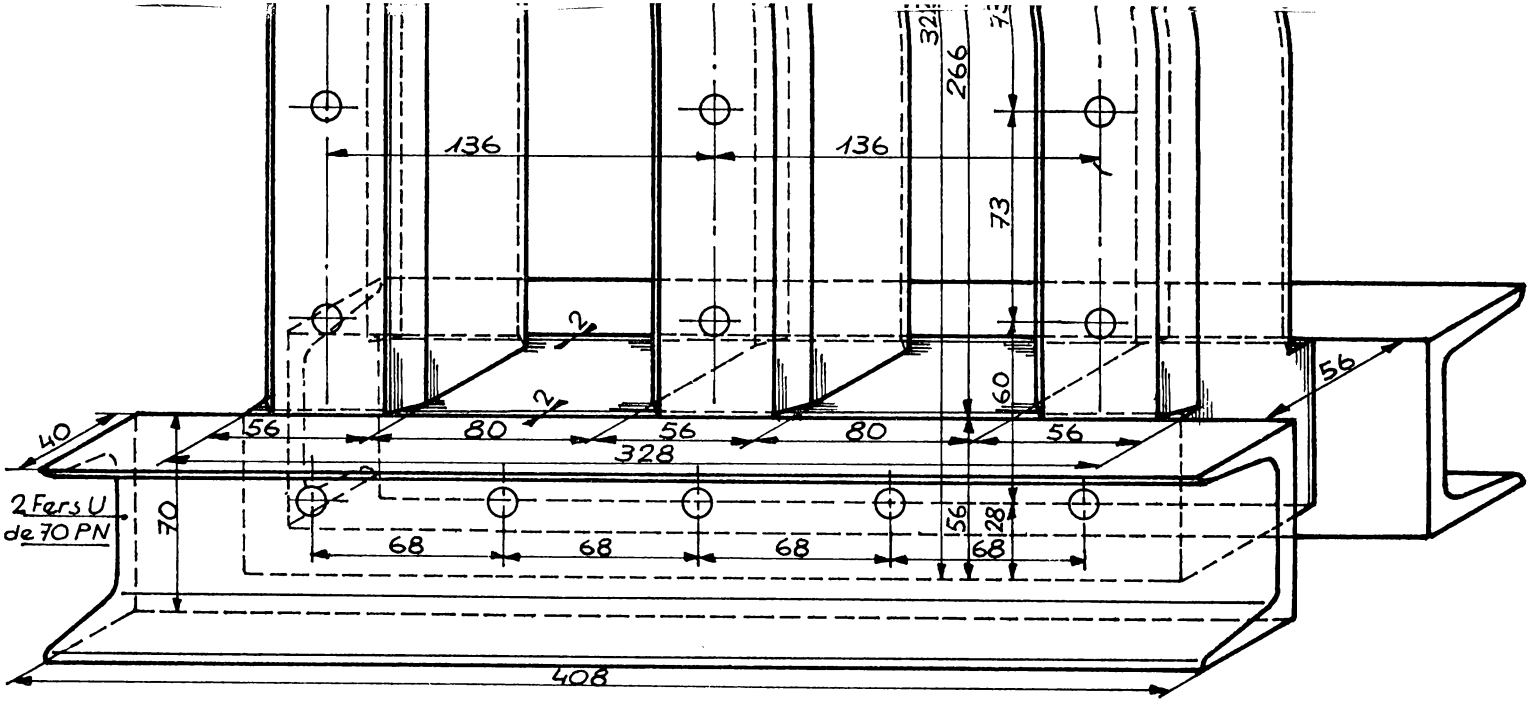


FIG. XVII-37. — Dessin d'assemblage d'un circuit magnétique de transformateur triphasé de 3 kVA, 50 Hz, dont on a sectionné les angles des noyaux pour réduire le diamètre des bobines. Les tôles utilisées ont 0,4 mm d'épaisseur. Des tôles de serrage de 2 mm d'épaisseur recouvrent les deux faces du circuit magnétique.

L'assemblage est réalisé avec des fers U de 70 PN et serré par des boulons de 8 mm de diamètre. Ces derniers sont isolés du circuit magnétique par de petits tubes en bakélite de 8/10 mm de diamètre.

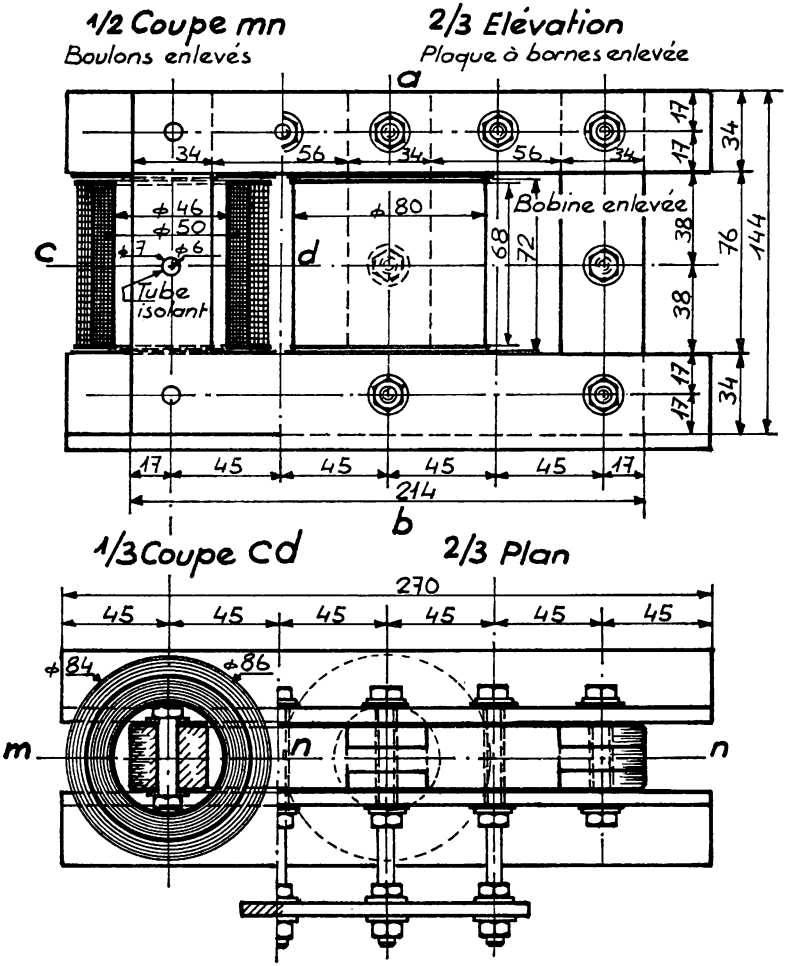
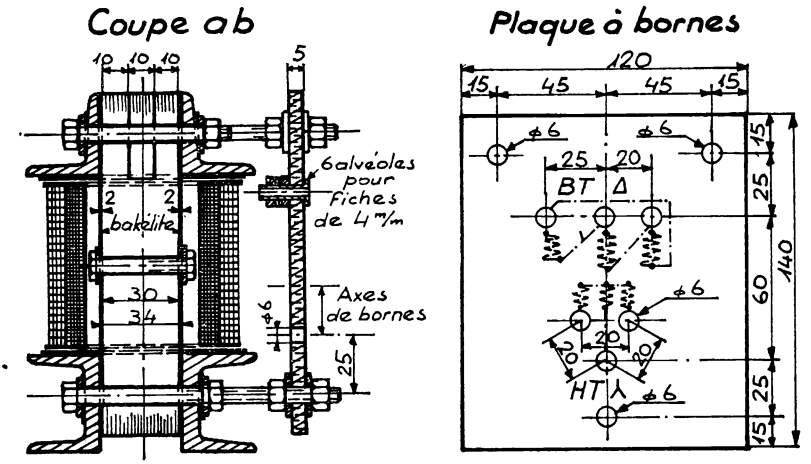


FIG. XVIII-3. — Transformateur triphasé de 200 W, 30/220 V, étoile-triangle, 50 Hz. Le schéma de raccordement du bobinage est donné sur le dessin de la plaque à bornes.

L'enchevêtrement des tôles de la traverse supérieure se fait en trois paquets finement ajustés.



3,2. Le circuit magnétique

Il est composé de tôles d'acier au silicium de 0,4 mm d'épaisseur, isolées au vernis et empilées sur 30 mm d'épaisseur.

La culasse du bas et les trois noyaux sont formés d'une seule tôle; la culasse mobile du haut est enchevêtrée avec les tôles du noyau, comme il est indiqué sur le dessin de la *figure XVIII*-3.

Deux joues en bakélite de 2 mm d'épaisseur sont disposées de part et d'autre du paquet de tôles.

Deux fers à l'équerre de 30 mm et deux fers U de 40 × 30 mm, disposés en haut et en bas du circuit magnétique, bloquent l'ensemble au moyen de 8 boulons en fer de 6 mm de diamètre. Ces boulons sont isolés avec un tube en papier bakélisé de 6-7 mm de diamètre et 34 mm de long.

Une plaque à bornes en bakélite supportée par 3 tiges filetées de 6 × 100 mm isolées du circuit magnétique, complètent le montage.

3,3. Bobinage du transformateur

Il s'effectue sur trois bobines en bakélite, construites pour recevoir les deux enroulements, primaire et secondaire. Les bobines primaires et secondaires seront toutes enroulées dans le même sens sur les trois colonnes. Cela est indispensable pour obtenir des flux additifs dans les noyaux.

L'enroulement primaire : 220 V en étoile.

Il se compose de neuf couches de 75 spires de fil de cuivre de 0,6 mm de diamètre nu, isolé émail, soit 110 m de long pour 675 spires par colonne.

On placera un papier ou une toile isolante entre chaque couche du bobinage.

Les entrées et sorties des bobines seront pourvues d'un câble souple de 1 mm isolé et soudé au fil émaillé, avant la dernière spire, qui sera constituée par le câble. On aura ainsi des sorties renforcées mécaniquement.

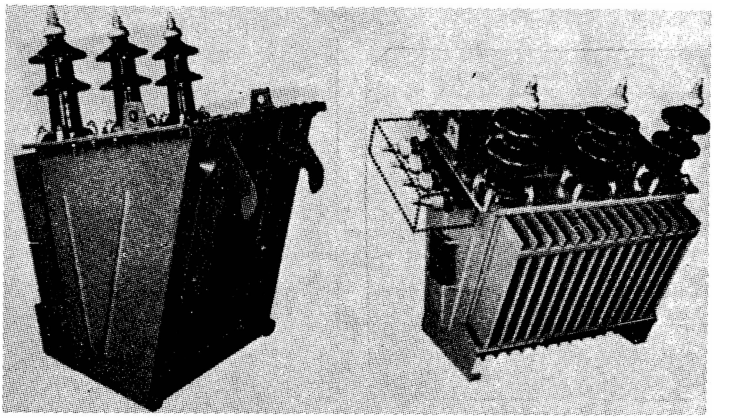


FIG. XVIII-4. — Deux vues d'un transformateur triphasé pour montage sur poteau. La puissance nominale de ces transformateurs s'étage comme suit : 25 - 50 - 100 kVA pour des tensions primaires de 5,5 - 10 - 15 - 20 kV et des tensions secondaires à vide de 400/231 V. Document Unelec.

L'enroulement secondaire est connecté en triangle.

Il est formé de quatre couches de 38 spires de fil de cuivre de 1,2 mm de diamètre nu, isolé émail, ou de deux couches de coton. On enroulera ainsi 33 m de fil pour 152 spires par phase.

L'enroulement secondaire sera placé sur l'enroulement primaire (enroulement concentrique), après avoir enrobé ce dernier d'une bande de presspahn de 1 mm d'épaisseur.

Les entrée et sortie seront renforcées mécaniquement par un isolant en souplisseau.

Le bobinage sera recouvert d'un vernis isolant qui maintiendra les spires en place après séchage et leur donnera un brillant.

XVIII,4. FABRICATION DUN TRANSFORMATEUR TRIPHASÉ DE 2 kVA

4,1. Caractéristiques générales (*fig. XVIII-5*)

Puissance en service continu : 2 kVA.

Couplage : étoile - étoile.

Tension au primaire : 220 V.

Résistance à chaud par colonne : 0,59 ohm et une chute de tension de 3,25 V.

Tensions au secondaire : 20 V, 40 V, 60 V et 80 V en a_4, b_4, c_4.

Résistance à chaud par colonne : 0,1 ohm et 1,5 V de chute de tension.

Intensité bobines primaires : 5,5 A (densité 2,2 A par mm²).

Intensité bobines secondaires : 14,2 A (densité 2 A par mm²).

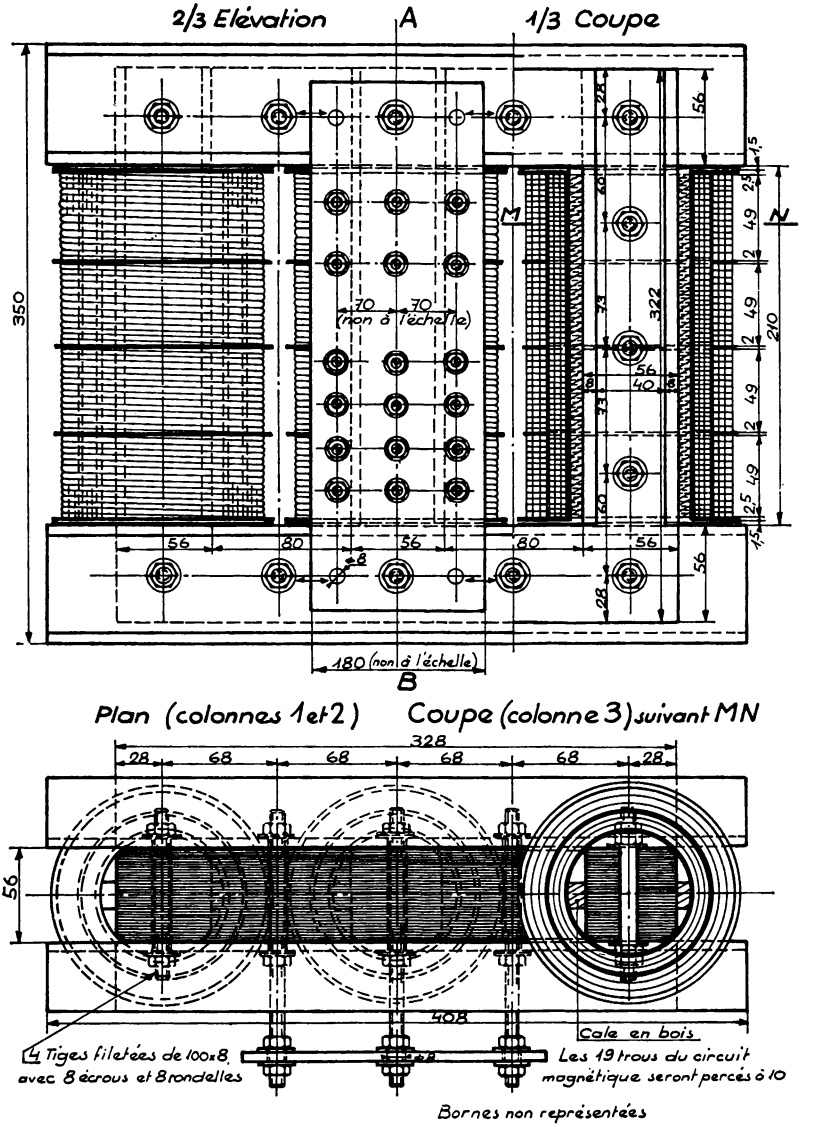
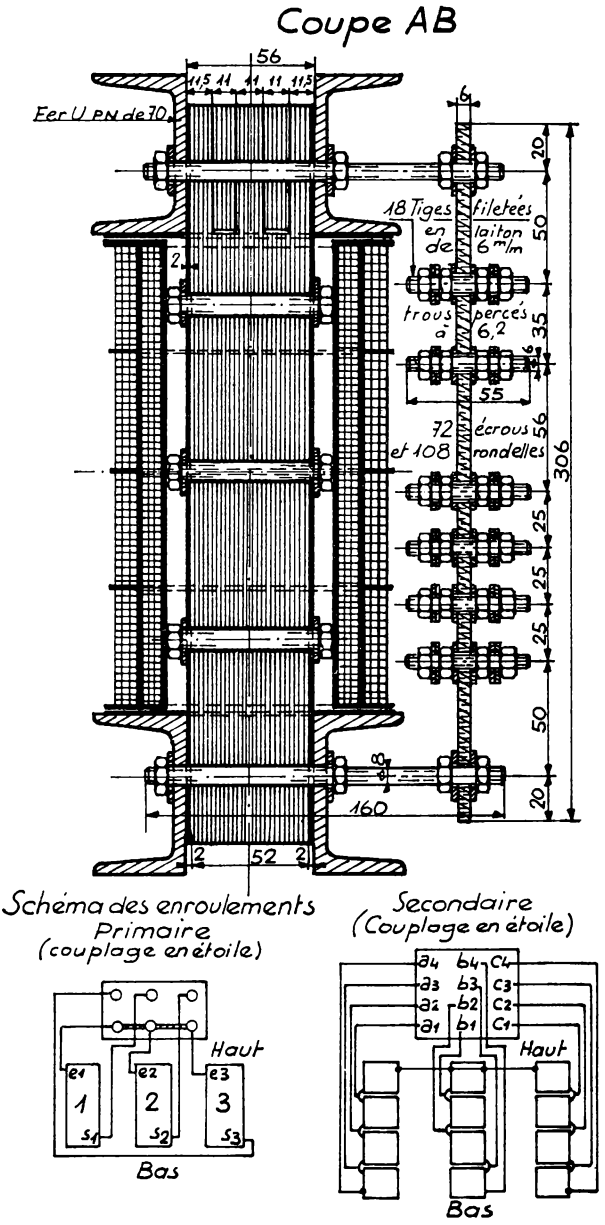


FIG. XVIII-5. — Trois vues d'un transformateur triphasé de 2 kVA, 50 Hz, couplage étoile-étoile, 220 V au primaire, sorties multiples au secondaire, soit : 20 V entre a_1 b_1 c_1, 40 V entre a_2 b_2 c_2, 60 V entre a_3 b_3 c_3 et 80 V entre a_4 b_4 c_4.


Coupe AB
56
11,5 11 11 11 11,5
Fer U PN de 70
6
20
18 Tiges filetées en laiton de 6 m/m
50
2
trous percés à 6,2
35
6
55
72 écrous et 108 rondelles
56
306
25
25
25
50
8
20
160
2 52 2
Schéma des enroulements
Primaire
(couplage en étoile)
Haut
e1 e2 e3
1 2 3
s1 s2 s3
Bas
Secondaire
(Couplage en étoile)
a4 b4 c4
a3 b3 c3
a2 b2 c2
a1 b1 c1
Haut
Bas

4,2. Le circuit magnétique

Composition.

Il comporte 24 kg de tôles d'acier au silicium, de 0,4 mm d'épaisseur, isolées au vernis.

La section nette du fer est de 24 cm^2.

L'induction maximale = 9 200 gauss (1 tesla = 10^4 gauss).

La fermeture du circuit magnétique se fait au moyen de la culasse mobile, par paquets enchevêtrés sur la partie supérieure des trois colonnes.

Les colonnes, de section carrée, sont fraisées sur les quatre angles pour diminuer le diamètre des bobines. Celles-ci sont calées sur les colonnes par des baguettes en bois, comme l'indique le dessin.

Le circuit magnétique est isolé sur ses deux faces par de la bakélite de 2,5 mm d'épaisseur.

Les fers U, disposés en haut et en bas sur les culasses, sont isolés des bobines par des rondelles en bakélite de 2 mm d'épaisseur, percées aux dimensions des colonnes qu'elles encadrent.

Montage et assemblage.

L'assemblage comporte : 9 boulons isolés de 8 × 70 mm, 8 boulons isolés de 8 × 90 mm, 6 tiges filetées de 8 × 160 mm isolées dans la partie fer par un tube isolant de 8/10 de diamètre, comme les boulons précédents.

Les six tiges filetées supportent, à l'une de leurs extrémités, la plaque à bornes constituée par une planchette en bakélite de 6 mm d'épaisseur × 180 × 306 mm, et 18 bornes primaires et secondaires, constituées par des tiges filetées en laiton de 6 × 55 mm, (voir le dessin).

4,3. Bobinage du transformateur.

Il s'effectue sur trois cylindres en presspahn de 3 mm d'épaisseur, comportant, aux extrémités, des joues ajustées, du même isolant que les cylindres.

L'enroulement primaire sera du type « concentrique »; le secondaire, du type concentrique, mais divisé en galettes.

Le bobinage s'effectue avec un tour, sur lequel on fixe un mandrin en bois ayant le diamètre des cylindres isolants.

L'enroulement primaire : 220 V en étoile.

Il est composé de 5,200 kg de fil de cuivre, d'une section de 2,54 mm², d'un diamètre nu de 1,8 et 2,2 mm avec un isolement constitué de deux couches de coton croisées.

L'enroulement d'une bobine est réparti sur trois couches (isolées l'une de l'autre par un isolant en toile ou en papier), de 90 spires chacune, soit 270 spires et 75 m de fil.

Le bobinage est du type concentrique. Les entrée et sortie seront renforcées par un souplisseau, qui sera enroulé sur un ou deux tours sur la bobine.

L'enroulement secondaire en étoile (à prises multiples).

Il comporte 6,93 kg de fil de cuivre, d'une section de 7,06 mm², d'un diamètre nu de 3 mm, et 3,4 mm avec deux couches coton croisées.

L'enroulement secondaire est du type « concentrique ». Il comporte, sur chaque colonne, 4 bobines de chacune 24 spires, disposées en trois couches de 8 spires, soit 96 spires d'une longueur de 35 m (105 m pour trois colonnes).

Les raccords entre deux bobines peuvent se faire soit en doublant les fils de sortie jusqu'à la plaque à bornes, doit en coupant un fil pour le souder à l'autre dès la sortie de la bobine.

Les galettes peuvent se faire sur bobines, ou être formées sur un mandrin, en ayant soin de retenir les spires des extrémités au moyen d'une tresse prise sur les dernières spires. Le tout, bakélisé ou gommelaqué, est séché pour rendre la bobine homogène. Le diamètre du mandrin doit tenir compte de l'isolant placé sur le primaire.

Dans ce dernier cas, on dispose, sur l'enroulement primaire, une bande de presspahn de 2 mm d'épaisseur, pour recevoir les 4 bobines, que l'on sépare l'une de l'autre par des rondelles de presspahn ou de bakélite de 2 mm d'épaisseur.

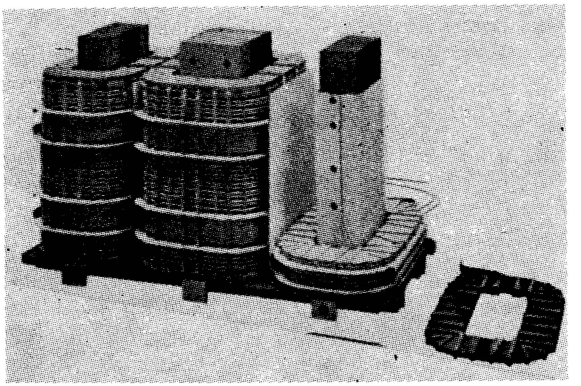


FIG. XVIII-6. — Montage des galettes d'un transformateur de locomotive électrique. Ce transformateur très spécial comporte un noyau central d'une section double. La colonne de droite est en cours de bobinage, ce qui permet de voir son noyau isolé et un disque isolant supportant les tasseaux facilitant la circulation de l'huile de refroidissement entre les galettes. Document Oerlikon.

Les entrées des trois galettes supérieures seront rassemblées pour former l'étoile du secondaire. Pour le reste des connexions, consultez le schéma de la *figure XVIII-5*.

IMPRIMERIE OFFSET-AUBIN, 86000 POITIERS
Dépôt légal, 3e trimestre 1979. Impr., P 8935.
Imprimé en France.

Extrait de notre catalogue

C. GUEMAS

Le Chauffage Central

Principes - Technique - Installation

Établissements d'Enseignement Technique, Cours Professionnels
200 pages - 21 × 29,7 - Broché

G. PELATAN

Le Métré

Gros œuvre

LET, Lycées Techniques, IUT, Cours Professionnels
72 pages - 21 × 29,7 - Broché

R. CHARBUY - P. JUSTE

Dessin de Serrurerie et Charpente métallique

Établissements d'Enseignement Technique, Cours Professionnels
136 pages - 21 × 29,7 - Broché

P. ROBERJOT ET J. LOUBIGNAC

Electrotechnique appliquée

Lycées techniques, instituts universitaires de technologie, préparation au brevet de technicien supérieur en électrotechnique.

Tome 1. — Essais des Machines électriques
432 pages - 15,5 × 24 avec 457 figures - Broché

Tome 2. — Mesures électriques en courant continu et en régimes transitoires
264 pages - 15,5 × 24 avec 279 figures - Broché

G. LOUIS

Electrotechnique aux B.E.P.

Classes préparatoires au B.E.P. électrotechnique, lycées d'enseignement professionnel, cours professionnels.

Tome 1. — Electrostatique, courant continu, électromagnétisme, courant alternatif
248 pages - 16 × 22 avec 206 figures - Broché

Tome 2. — Machines électriques, redresseurs, semi-conducteurs...
192 pages - 16 × 22 avec 204 figures - Broché

M. BOUISSOUX et J. MONTAGNAC

Cours de schémas d'électricité

Accompagné d'extraits de normes françaises

Préparation au brevet de technicien en électrotechnique et aux C.A.P. d'électro-mécanicien et d'électricien d'équipement

*248 pages. 1 dépliant. 24 x 31,5. Broché.

R. PRET et J. FLOC'H

Manipulations d'électricité

Lycées d'enseignement professionnel
Lycées techniques

352 pages. 15,5 x 24. Broché.

A. TRANCHART et R. CHASSINAT

Problèmes élémentaires d'électricité,

avec réponses

Lycées techniques, L.E.P., formation professionnelle
Préparation au baccalauréat de technicien

320 pages. 15,5 x 24. Broché.

****Ouvrage inscrit sur la liste des manuels adoptés par les écoles de la Ville de Paris.***

ISBN : 2-04-008812-1